



TUGAS AKHIR - TM 091 585

VALIDASI REDUKSI GETARAN DAN ENERGI
LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME
CANTILEVER PIEZOELECTRIC VIBRATION
ABSORBER (CPVA)

HILMAN SYAHIR
NRP 2115 105 052

Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati ST.,MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018



TUGAS AKHIR – TM 091 585

**VALIDASI REDUKSI GETARAN DAN ENERGI
LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME
CANTILEVER PIEZOELECTRIC VIBRATION
ABSORBER (CPVA)**

HILMAN SYAHIR
NRP. 2115 105 052

Dosen Pembimbing:
Dr. Wiwiek Hendrowati ST.,MT.

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018



FINAL PROJECT – TM 091 585

**VALIDATION OF VIBRATION REDUCTION AND
VOLTAGE OUTPUT BY CANTILEVER
PIEZOELECTRIC VIBRATION ABSORBER (CPVA)
MECHANISM**

HILMAN SYAHIR
NRP. 2115 105 052

Thesis Advisor
Dr. Wiwiek Hendrowati ST.,MT.

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2018

**VALIDASI REDUKSI GETARAN DAN ENERGI
LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME
CANTILEVER PIEZOELECTRIC VIBRATION
ABSORBER (CPVA)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

HILMAN SYAHIR

NRP. 2115 105 052

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. (Pembimbing)
NIP. 197004121997032003
2. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST. (Penguji I)
M.Eng.
NIP. 197505111999031001
3. Aida Annisa Amin Daman, ST., MT. (Penguji II)
NIP. 198907052015042005
4. Moch. Solichin, ST., MT. (Penguji III)
NIP. 198908172015041003

SURABAYA

JANUARI 2018

VALIDASI REDUKSI GETARAN DAN ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME CANTILEVER PIEZOELECTRIC VIBRATION ABSORBER (CPVA)

Nama Mahasiswa : Hilman Syahir
NRP : 2115105052
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

Abstrak

Mesin merupakan salah satu penghasil getaran. Arah getaran yang terjadi bisa terjadi pada semua arah, namun untuk beberapa mesin, getaran yang terjadi cenderung pada arah translasi atau hanya arah rotasinya saja. Jika getaran yang terjadi sama dengan frekuensi natural sistem maka akan menurunkan kinerja mesin bahkan dapat merusak komponen dari mesin. Salah satu upaya yang dapat dilakukan yaitu dengan menambahkan Dynamic Vibration Absorber (DVA) dengan mekanisme Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA). Beberapa penelitian telah dilakukan oleh Imam Safei^[1] dan Faiz Imawan Danaputra^[2] tentang analisa dan eksperimen Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA) sebagai peredam getaran dan pembangkit energi listrik. pada penelitian tersebut masih terdapat kekurangan yang diakibatkan oleh rangka dari alat simulator yang belum rigid. Hal ini mendasari pada penelitian ini untuk dilakukan perbaikan rangka simulator getaran dengan penambahan mekanisme CPVA yang divalidasi antara hasil simulasi dan eksperimen menggunakan Uji T Independent.

Dalam penelitian Tugas Akhir ini dilakukan perbaikan rangka simulator dengan penambahan mekanisme CPVA. Permodelan dinamis dari perbaikan rangka dengan penambahan mekanisme CPVA disimulasikan menggunakan program Simulink matlab dengan data parameter yang diambil dari penelitian Faiz

Imawan Danaputra^[2] . Rangka yang telah diperbaiki dengan penambahan mekanisme CPVA selanjutnya dilakukan pengujian dengan beberapa variasi input frekuensi (5.1, 5,7 dan 6.1 Hz), jarak peletakan CPVA dari pusat massa utama (0, 10, 20 cm) dan jumlah piezoelectric (8, 10, 12 buah). Hasil pengujian simulasi dan eksperimen akan divalidasi menggunakan metode Uji T Independent.

Dari penelitian Tugas Akhir ini didapatkan hasil validasi antara hasil simulasi dan eksperimen pada frekuensi 5,7 hz ketika tanpa CPVA 95,6% untuk arah translasi dan 95,9% untuk arah rotasi dan menghasilkan hasil yang valid ketika tanpa CPVA. Hasil reduksi getaran didapatkan nilai terbaik pada penempatan CPVA 10 cm dari titik pusat massa utama untuk respon percepatan translasi sebesar 99,47% dan 99,79% untuk rotasi dan menghasilkan hasil yang valid. validasi energi listrik bangkitan yang terbesar didapatkan pada peletakan CPVA 10 cm dari titik pusat massa utama sebesar 99,74%. Validasi reduksi percepatan pada sistem massa utama dan energy listrik bangkitan (volt) dengan peletakan CPVA 10 cm didapatkan t_{hit} translasi (1,71) ; t_{hit} rotasi (0,347) ; t_{hit} volt (0,122) < t_{tab} (2,312) yang menyimpulkan bahwa terdapat kesamaan data antara simulasi dan eksperimen pada respon percepatan sistem massa utama dan menghasilkan hasil yang valid.

Kata kunci: Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA), Piezoelectric, Validasi, Reduksi, Energi Listrik

**VALIDATION OF VIBRATION REDUCTION AND
VOLTAGE OUTPUT BY CANTILEVER
PIEZOELECTRIC VIBRATION ABSORBER (CPVA)
MECHANISM**

Student's Name : Hilman Syahir
NRP : 2115105052
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Thesis Advisor : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

Abstract

Machine is one of the source of vibration. The direction of vibration can occur in all directions, but for some machines, the vibrations tend to occur in the translation direction or rotational. If the vibration have equal amount to the natural frequency of the system will reduce the performance of the engine or even damage the components of the machine. One of the method to reduce in a machine is to add Dynamic Vibration Absorber (DVA) with the Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA) method. Several reseaches have been conducted by Imam Safei^[1] and Faiz Imawan Danaputra^[2] on the analysis and experiments of Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA) as vibration dampers and electric power generation. The result show by the studies suggest weakness caused by the framework of the rigid simulator tool. The base of this reseach is to improve vibration simulator frame by the addition of CPVA mechanism which is validated between the simulation result and the experiment using Independent T Test.

In this Final Project, simulator frame improvement is done by the addition of CPVA mechanism. The dynamic modelling of framework improvements with the addition of the CPVA mechanism is simulated using the Simulink matlab program with the parameter data taken from Faiz Imawan Danaputra's research^[2]. Improved framework with the addition of a CPVA mechanism was further tested with variations of

frequency inputs (5.1, 5.7 and 6.1 Hz), CPVA laying distance from main mass centers (0, 10, 20 cm) and the amount of piezoelectric (8, 10, 12 pieces). The simulation and experimental results will be validated using the Independent T test method.

From this research, the result of validation between simulation result and experiment at 5.7 hz frequency without CPVA is 95,6% for translational direction and 95,9% for rotation direction shows valid result when used without CPVA. The best value of vibration reduction result when the placement of CPVA is 10 cm from the main mass center point with the translation acceleration response of 99.47% and 99.79% for the rotation and the result are valid. validation of the largest electrical energy generation is obtained at the placement of CPVA 10 cm from the main mass center point of 99.74%. Validation of acceleration reduction in the main mass system and electrical energy of the rise (volts) by placement of CPVA 10 cm obtained by translation t_{count} (1.71); t_{count} rotation (0.347); t_{count} volt (0.122) $< t_{table}$ (2,312) which concludes that there are a similarity of data between simulations and experiments on the major system mass acceleration response and yields valid results.

Keywords: Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA), Piezoelectric, Validation, Reduction, Electrical Energy.

KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadiran Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang Tua penulis, Bapak Arisman dan Ibu Titin Tini Agustini yang senang tiasa mendoakan dan memberikan dukungan moril dan materil.
2. Saudara kandung penulis, Diki Nur Fitra dan Rika Sabrina Tamimi yang selalu mendoakan dan menjadi semangat penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
3. Wanita Hebat setelah Ibu dan Adik Tercinta, Dini Agustina Pratiwi yang senangtiasa memberikan dukungan kepada penulis agar segera menyelesaikan studinya.
4. Dr. Wawan Aries Widodo ST.,MT selaku dosen wali yang telah memberikan sajian ilmu dan dukungan kepada penulis.
5. Dr. Wiwiek Hendrowati ST.,MT. yang sabar dan selalu memberikan bimbingan, arahan dan sajian ilmu dalam penulisan Tugas Akhir ini.
6. Dr Eng. Harus Laksana Guntur ST.,M.Eng., Moch. Solichin, ST., MT., dan Aida Annisa A.D., ST., MT. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang Tugas Akhir ini.

7. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama ini.
8. Personil Kontrakan pak mus dan member ambleh-mbleh seperti Depi rustam ependi selaku teman sekamar yang sedang menempuh S-2nya, Rifki zain selaku tetangga kamar dan sedang menempuh S-1nya, Avif selaku bendahara kontrakan dan sedang menempuh S-1nya, Giffari dan Riky selaku tetangga kamar dan sedang menempuh S-1nya, Opik selaku orang yang menempati kamar yang dulu saya tempati dan sedang menempuh S-1nya, dan Aditya, Dicky dan Mulki selaku teman Lintas Jalur yang telah lulus duluan yang senang tiasa mengganggu penulis agar segera menyelesaikan studinya.
9. Teman-Teman Lintas Jalur 2015 dan Semester 5 yang telah memberikan dukungan kepada penulis.
10. Teman-Teman Lab. Vibrasi yang telah membantu dalam proses tugas akhir ini

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2018

Hilman Syahir
NRP. 2115 105 052

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACK.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xxiii

BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan.....	4
1.5. Manfaat.....	5

BAB II DASAR TEORI & TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Dasar Teori.....	7
2.1.1 Derajat Kebebasan (<i>Degree Of Freedom</i>)	7
2.1.2 <i>Responce of a Damped System Under the Harmonic Motion of the Base</i>	8
2.1.3 <i>Dynamic Vibration Absorber (DVA)</i>	10
2.1.4 Dasar Teori <i>Piezoeelectric Material</i>	16
2.1.5 Validasi	25
2.2. Tinjaun Pustaka	27
2.3. Permodelan Sistem Dinamis.....	38
2.3.1 Penurunan Persamaan Gerak	40
2.3.1.1 Analisa Permodelan Sistem Utama tanpa Penambahan CPVA	40
2.3.1.2 Analisa Permodelan Sistem Utama dengan Penambahan CPVA	42

BAB III METODOLOGI	49
3.1. Tahapan Penelitian	49
3.2. Metode Pengerjaan Penelitian	50
3.2.1. Studi Literatur.....	51
3.2.2. Identifikasi Masalah	51
3.2.3. Penurunan Persamaan Gerak.....	51
3.2.4. Penentuan Parameter	51
3.2.4.1. Menentukan massa sistem utama (M_1).....	52
3.2.4.2. Menentukan massa sistem CPVA (M_2).....	52
3.2.4.3. Menentukan konstanta kekakuan pegas sistem utama dan CPVA.....	53
3.2.4.4. Menentukan konstanta pegas dari <i>cantilever Piezoelectric</i>	53
3.2.4.5. Menentukan frekuensi operasi pada sistem Utama	54
3.2.4.6. Parameter penelitian	55
3.2.5. Blok Diagram	56
3.2.6. Simulasi pada Matlab Simulink.....	56
3.2.7. Eksperimen.....	56
3.2.7.1. Peralatan Pengujian Utama	57
3.2.7.2. Skema Pengujian.....	59
3.2.7.3. Flowchart Pengambilan Data Gerak Translasi dan Rotasi.....	61
3.2.8. Analisa Hasil	63
3.2.9. Validasi Hasil	63
3.2.9.1. <i>Flowchart</i> Proses Validasi	63
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	67
4.1. Perbaikan Rangka Alat Simulator Getaran.....	67
4.2. Mekanisme Simulator Getaran dan CPVA.....	68
4.2.1 Mekanisme Alat Simulator Getaran	68
4.2.2 Mekanisme CPVA.....	74

4.3.	Permodelan Dinamis	77
4.3.1	Permodelan Matematis Tanpa CPVA	77
4.3.2	Permodelan Matematis dengan CPVA	79
4.4.	Analisa Hasil simulasi	83
4.4.1.	Analisa Respon Percepatan Translasi dan Rotasi Utama Tanpa CPVA.....	83
4.4.2.	Analisa Respon Percepatan Massa Utama dengan Peletakan CPVA 0 cm.....	84
4.4.2.1.	Analisa Mekanisme Sistem Utama Pada Jarak CPVA $b_1 = 0$ cm dengan jumlah <i>piezoelectric</i> 8 Buah	84
4.4.2.2.	Pengaruh Frekuensi dan Jumlah Piezoelectric Terhadap Respon Percepatan dan Energi Listrik Bangkitan	87
4.4.3.	Analisa Respon Percepatan Massa Utama dengan Peletakan CPVA 10 cm.....	90
4.4.3.1.	Analisa Mekanisme Utama Pada Jarak CPVA $b_2 = 10$ cm dengan jumlah <i>piezoelectric</i> 8 buah.....	90
4.4.3.2.	Pengaruh Frekuensi dan Jumlah Piezoelectric Terhadap Respon Percepatan dan Energi Listrik Bangkitan.....	92
4.4.4.	Analisa Respon Percepatan Massa Utama dengan Peletakan CPVA 20 cm.....	95
4.4.4.1.	Analisa Mekanisme Sistem Pada Jarak CPVA $b_3 = 20$ cm dengan jumlah <i>piezoelectric</i> 8 buah.....	95
4.4.4.2.	Pengaruh Frekuensi dan Jumlah Piezoelectric terhadap Respon Percepatan dan Energi Listrik Bangkitan.....	98
4.5.	Analisa Hasil Eksperimen	101
4.5.1.	Analisa Mekanisme Sistem Utama Tanpa CPVA	101
4.5.2.	Analisa Mekanisme Sistem Massa Utama dengan	

CPVA	110
4.5.2.1. Analisa Mekanisme Massa Utama dengan CPVA Pada Jarak b_1	110
4.5.2.2. Analisa Mekanisme Massa Utama dengan CPVA Pada Jarak b_2	112
4.5.2.3. Analisa Mekanisme Massa Utama dengan CPVA Pada Jarak b_3	115
4.6. Validasi Hasil Simulasi dan Eksperimen	117
4.6.1. Pembahasan Hasil Simulasi dan Eksperimen tanpa CPVA	117
4.6.2. Pembahasan Hasil Simulasi dan Eksperimen dengan CPVA	120
4.6.2.1. Analisa Hasil Simulasi dan Eksperimen dengan CPVA pada Jarak b_1	120
4.6.2.2. Analisa Hasil Simulasi dan Eksperimen Dengan CPVA pada Jarak b_2	124
4.6.2.3. Analisa Hasil Simulasi dan Eksperimen dengan CPVA pada Jarak b_3	127
4.6.3. Validasi Reduksi dan Energi Bangkitan (volt) pada Frekuensi 5,7 Hz	130
4.6.3.1. Pembahasan Reduksi Getaran Arah Translasi pada Frekuensi 5,7 hz terhadap Peletakan Jarak CPVA	130
4.6.3.2. Pembahasan Reduksi Getaran Arah Rotasi Pada Frekuensi 5,7 hz terhadap Peletakan Jarak CPVA	134
4.6.3.3. Pembahasan Energi Listrik Bangkitan pada Frekuensi 5,7 hz terhadap Peletakan Jarak CPVA	137
4.7. Validasi Uji T <i>Independent</i>	139
4.7.1. Validasi Uji T <i>Independent</i> Percepatan Arah Translasi dan Rotasi Sistem Massa Utama	139
4.7.1.1. Pembahasan Uji T <i>Independent</i> Sistem Massa Utama tanpa CPVA	142
4.7.2. Validasi Uji T <i>Independent</i> Pada Sistem Massa	

Utama dengan CPVA	142
4.7.2.1. Validasi Reduksi Percepatan Translasi	142
menggunakan Metode Uji T <i>Independent</i> 91	
4.7.2.2. Pembahasan Uji T <i>Independent</i> Respon Percepatan Translasi	144
4.7.2.3. Validasi Reduksi Percepatan Rotasi menggunakan Metode Uji T <i>Independent</i>	145
4.7.2.4. Pembahasan Uji T <i>Independent</i> respon Percepatan Rotasi	147
4.7.2.5. Validasi Energi Listrik Bangkitan Menggunakan Metode Uji T Independen ..	147
4.7.2.6. Pembahasan Uji T <i>Independent</i> terhadap Energi Listrik Bangkitan (volt)	149
BAB V KESIMPULAN & SARAN.....	151
5.1. Kesimpulan.....	151
5.2. Saran	152
DAFTAR PUSTAKA	155
LAMPIRAN.....	157
BIODATA PENULIS	161

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem <i>undamped</i> dengan 3 DOF	7
Gambar 2.2	<i>Base Excitation</i>	9
Gambar 2.3	<i>Undamped dynamic absorber</i>	11
Gambar 2.4	<i>Effect of undamped vibration absorber on response of machine</i>	13
Gambar 2.5	<i>Damped dynamic vibration absorber</i>	14
Gambar 2.6	Pengaruh <i>damped vibration absorber</i> on <i>the response of machine</i>	16
Gambar 2.7	contoh bentuk <i>piezoelectric</i>	17
Gambar 2.8	<i>Cantilever piezoelectric</i>	19
Gambar 2.9	<i>Free body diagram dari cantilever piezoelectric</i> 20	
Gambar 2.10	Model permanen energy kinetic menggunakan <i>cantilever piezoelectric</i>	21
Gambar 2.11	Rangkaian listrik pemanen <i>energy kinetic</i>	21
Gambar 2.12	Susunan pararel material <i>piezoelectric</i>	22
Gambar 2.13	konstanta pegas disusun pararel	22
Gambar 2.14	<i>Piezoelectric</i> disusun secara seri	23
Gambar 2.15	Sirkuit elektromagnetik pada <i>cantilever piezoelectric</i>	24

Gambar 2.16 Model dinamis dari sistem massa utama dengan penambahan CPVA.....	28
Gambar 2.17 Grafik perbandingan respon sistem utama tanpa CVPA (a) data hasil simulasi (b) data hasil eksperimen	29
Gambar 2.18 Grafik perbandingan respon dengan CPVA (a) data hasil simulasi (b) data hasil eksperimen	30
Gambar 2.19 Grafik perbandingan respon sistem CPVA arah rotasi (a) pada simulasi (b) pada eksperimen.....	32
Gambar 2.20 Grafik daya terhadap frekuensi untuk beberapa beban resistansi yang berbeda dan diperoleh dengan pemodelan matematis	33
Gambar 2.21 model mekanis dari <i>piezoelectric actuator</i>	34
Gambar 2.22 hasil eksperimen dan simulasi (a) perbandingan hasil pada variasi kecepatan dengan duty ratio (b) perbandingan dari hubungan kecepatan sudut dengan penggerak voltage.....	35
Gambar 2.23 (a) <i>prototype</i> alat mekanisme pemetik dari <i>piezoelectric energy harvester</i> (b) ilustrasi cara kerja dari <i>prototype</i>	36
Gambar 2.24 (A) perbandingan antara hasil dari simulasi dan ekperiment pada kecepatan 2.5 s per revolution (a) perpindahan	

(b) voltase (c) energy yang dihasilkan	37
Gambar 2.25 (B) perbandingan antara hasil dari simulasi dan ekperiment pada kecepatan 1 s per revolution (a) perpindahan (b) voltase (c) energy yang dihasilkan	37
Gambar 2.26 (a) Alat simulator getaran & (b) <i>cantilever</i> <i>piezoelectric vibration absorber</i> (CPVA)	38
Gambar 2.27 alat simulator getaran dengan penambahan <i>cantilever piezoelectric vibration absorber</i> (CPVA)	38
Gambar 2.28 permodelan sistem dinamis tanpa penambahan CPVA	39
Gambar 2.29 permodelan sistem dinamis dengan penambahan CPVA	39
Gambar 2.30 <i>Free-Body-Diagram</i> dari massa sistem utama tanpa penambahan <i>CPVA</i>	41
Gambar 2.31 <i>free-body-diagram</i> dari <i>sistem</i> utama dengan penambahan <i>CPVA</i>	42
Gambar 2.32 <i>free-body-diagram</i> dari <i>absorber</i> pada mekanisme <i>CPVA</i>	44
Gambar 2.33 <i>Free-body-diagram</i> dari <i>piezoelectric cantilever</i> pada mekanisme <i>CPVA</i>	45

Gambar 2.34	skema piezoelectric yang dipengaruhi energi mekanik dan arah polarisasi	46
Gambar 2.35	diagram rangkaian <i>electromagnetic piezoelectric</i> jenis batang <i>cantilever</i>	47
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	50
Gambar 3.2	Piezoelektrik Minisense 100 <i>Vibration Sensor</i> .	54
Gambar 3.3	Dimensi material piezoelektrik yang digunakan	54
Gambar 3.4	Pemodelan sistem utama	57
Gambar 3.5	Pemodelan <i>CPVA</i>	58
Gambar 3.6	Skema pengujian gerak translasi	59
Gambar 3.7	Skema pengujian gerak rotasi.....	59
Gambar 3.8	<i>flowchart</i> proses pengambilan data eksperimen .	62
Gambar 3.9	<i>flowchart</i> metode validasi <i>Indipendent sample uji-T</i>	63
Gambar 4.1	Alat simulator getaran (a) ^[1] Sebelum, (b) Sesudah Diperbaiki	68
Gambar 4.2	Alat simulator getaran	68
Gambar 4.3	Hasil pengukuran getaran bebas sistem utama dengan oscilloscope ^[1]	71
Gambar 4.4	Grafik hasil pengukuran getaran bebas sistem	

utama dengan <i>smoothing</i> dan <i>filtering</i> ^[1]	72
Gambar 4.5 Mekanisme CPVA ^[1]	74
Gambar 4.6 Grafik hasil pengukuran getaran bebas sistem CPVA dengan <i>smoothing</i> dan <i>filtering</i>	76
Gambar 4.7 Respon percepatan tanpa CPVA	84
Gambar 4.8 (a) Percepatan Arah Translasi (b) Percepatan Arah Rotasi (c) Energi Listrik bangkitan pada penempatan CPVA 0 Cm	86
Gambar 4.9 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan energy listrik bangkitan (volt)	88
Gambar 4.10 (a) Percepatan Arah Translasi (b) Percepatan Arah Rotasi (c) Energi Listrik bangkitan pada penempatan CPVA 10 cm dengan jumlah piezoelectric 8 buah	91
Gambar 4.11 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan energy listrik bangkitan.....	94
Gambar 4.12 (a) Percepatan Arah Translasi (b) Percepatan Arah Rotasi (c) Energi Listrik bangkitan pada penempatan CPVA 20 Cm	97

Gambar 4.13 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan energi listrik bangkitan.....	100
Gambar 4.14 Respon percepatan arah translasi dan rotasi	102
Gambar 4.15 Respon percepatan massa utama tanpa CPVA	104
Gambar 4.16 Respon Percepatan arah Translasi dan rotasi pada massa utama tanpa CPVA	106
Gambar 4.17 respon Percepatan pada massa utama tanpa CPVA	108
Gambar 4.18 grafik respon percepatan pada frekuensi 5,1 hz, 5,7 hz, dan 6,1 hz.....	109
Gambar 4.19 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan energy listrik bangkitan dengan Peletakan CPVA 0 cm.....	111
Gambar 4.20 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan energy listrik bangkitan dengan peletakan CPVA 10 cm.....	114
Gambar 4.21 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan energy listrik bangkitan dengan peletakan CPVA 20 cm.....	116
Gambar 4.22 Hasil Respon Percepatan Sistem massa utama tanpa CPVA	118

Gambar 4.23 Perbandingan respon percepatan dan energi listrik bangkitan antara simulasi dan eksperimen	122
Gambar 4.24 Perbandingan respon percepatan dan energi listrik bangkitan antara simulasi dan eksperimen	125
Gambar 4.25 Perbandingan respon percepatan dan energi listrik bangkitan antara simulasi dan eksperimen	128
Gambar 4.26 Pengaruh peletakan CPVA terhadap reduksi getaran arah translasi	131
Gambar 4.27 Pengaruh penempatan CPVA terhadap reduksi getaran arah translasi	133
Gambar 4.28 Pengaruh peletakan CPVA terhadap reduksi getaran arah rotasi	135
Gambar 4.29 Pengaruh penempatan CPVA terhadap reduksi getaran arah rotasi	136
Gambar 4.30 Pengaruh peletakan CPVA terhadap energi listrik Bangkitan	138

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Energi bangkitan, <i>displacement</i> dan kapasitansi pada material <i>piezoelectric</i>	18
Tabel 2.2	Sifat Mekanik Beberapa Material <i>Piezoelectric</i>	19
Tabel 3.1	Parameter Penelitian.....	55
Tabel 4.1	Massa utama	69
Tabel 4.2	Pengujian k_1	70
Tabel 4.3	Pengujian k_2	70
Tabel 4.4	Redaman sistem utama ^[1]	74
Tabel 4.5	Pengujian k_3 ^[1]	76
Tabel 4.6	Redaman sistem CPVA ^[1]	77
Tabel 4.7	Frekuensi natural sistem dengan CPVA.....	82
Tabel 4.8	Respon percepatan dan energi listrik bangkitan dengan CPVA (b_1).....	87
Tabel 4.9	Respon percepatan dan energi listrik bangkitan dengan CPVA (b_2).....	92

Tabel 4.10	Respon percepatan dan energi listrik bangkitan dengan CPVA (b_3)	98
Tabel 4.11	Error hasil simulasi dan eksperimen tanpa CPVA	119
Tabel 4.12	Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen pada frekuensi 5,7 Hz pada Peletakan CPVA 0 cm	123
Tabel 4.13	Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen pada frekuensi 5,7 Hz pada peletakan CPVA 10 cm	126
Tabel 4.14	Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen pada frekuensi 5,7 Hz pada peletakan CPVA 20 cm	129
Tabel 4.15	Reduksi Percepatan Translasi hasil simulasi	132
Tabel 4.16	Reduksi Percepatan Translasi hasil eksperimen	132
Tabel 4.17	Reduksi Percepatan rotasi hasil simulasi	136
Tabel 4.18	Reduksi Percepatan rotasi hasil eksperimen	136
Tabel 4.19	hubungan peletakan CPVA terhadap energi listrik bangkitan	138
Tabel 4.20	RMS respon getaran translasi dan rotasi pada simulasi dan eksperimen	140
Tabel 4.21	Reduksi Percepatan arah translasi pada jarak	

0 cm	143
Tabel 4.22 Reduksi Percepatan arah translasi terhadap Peletakan CPVA.....	144
Tabel 4.23 Reduksi Percepatan arah rotasi pada jarak 0 cm	145
Tabel 4.24 Reduksi percepatan arah rotasi terhadap peletakan CPVA	146
Tabel 4.25 Energi listrik Bangkitan (volt) hasil simulasi dan eksperimen	148
Tabel 4.26 Validasi Energi listrik Bangkitan (volt) terhadap peletakan CPVA	149

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Dalam kehidupan sehari-hari kita sering bekerja dengan menggunakan bantuan mesin, dimana mesin merupakan salah satu sumber penghasil getaran. Getaran pada mesin dapat terjadi ke segala arah, namun untuk mesin-mesin tertentu getaran yang terjadi cenderung ke arah translasi dan rotasinya, seperti getaran yang terjadi pada mesin bubut, mesin bor dan sejenisnya. Kehadiran getaran tersebut sering menyebabkan keausan pada bantalan, keretakan, dan kerusakan mekanik lainnya. Apalagi jika getaran yang ditimbulkan secara berlebihan karena frekuensi operasinya mendekati atau bahkan sama dengan frekuensi natural dari sistem tersebut. Jika hal ini dibiarkan, maka kinerja mesin tersebut menurun atau bahkan membuat mesin tersebut tidak dapat dioperasikan. Oleh sebab itu sangat penting untuk dapat meredam atau bahkan menghilangkan getaran tersebut. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mereduksi getaran berlebih yang terjadi adalah dengan melakukan penambahan *Dynamic Vibration Absorber* (DVA) pada mesin yang bekerja. DVA itu sendiri adalah memasang suatu massa dengan konstanta kekakuan dan konstanta redaman tertentu pada alat yang mengalami getaran. Tujuan dari penambahan DVA adalah untuk meredam getaran dimana getaran merupakan suatu energi kinetik. Prinsip kerja DVA adalah menyerap sebagian energi yang berlebihan serta mengubah frekuensi operasional dari suatu alat. Energi yang diserap melalui DVA dapat dimanfaatkan dan diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan piezoelektrik.

Dari latar belakang banyaknya kerusakan permesinan yang diakibatkan oleh getaran maka diadakan suatu penelitian yang menunjukkan respon dari getaran tersebut. Penelitian tersebut dilakukan oleh Imam Safei^[1] dan Faiz Danawan Putra^[2] tentang rancang bangun dan simulasi dari mekanisme *cantilever piezoelectric vibration absorber* (CPVA) sebagai peredam dan pembangkit energi listrik. CPVA merupakan suatu mekanisme dari sistem DVA yang mampu mereduksi getaran dan menambahkan *cantilever piezoelectric* yang dapat membangkitkan energi listrik yang diakibatkan oleh getaran. Rancang bangun alat simulator getaran pada penelitian tersebut dibuat dalam skala laboratorium yang mempresentasikan getaran pada mesin. Pada penelitian tersebut alat mekanisme CPVA ditempatkan pada titik pusat massa utama dari alat simulator. Variasi yang diberikan yaitu variasi frekuensi (5,1 Hz, 5,7 Hz, dan 6,1 Hz) jarak penempatan alat CPVA pada simulator getaran (0 cm, 10cm, dan 20cm dari titik pusat massa utama alat simulator getaran) dan jumlah variasi piezoelectric yang digunakan (8 buah, 10 buah dan 12 buah).

Analisa hasil respon getaran yang didapatkan ketika tanpa penambahan CPVA untuk percepatan didapatkan dari eksperimen adalah nilai $0,2077 \text{ m/s}^2$ arah translasi dan $0,4741 \text{ rad/s}^2$ arah rotasi dan untuk hasil dari simulasi adalah nilai 40 m/s^2 arah translasi dan 37 rad/s^2 arah rotasi. Hasil respon getaran dengan penambahan CPVA dengan perubahan jarak peletakan CPVA dan jumlah piezoelectric didapatkan nilai pada jarak 10 cm dari titik pusat massa dengan input frekuensi natural sistem sebesar 6,4 Hz didapatkan nilai respon percepatan sebesar 0,007

m/s^2 arah translasi dan $0,003 \text{ rad}/s^2$ arah rotasi untuk hasil dari eksperimen. Untuk hasil simulasi didapatkan respon percepatan sebesar $3,8 \text{ m}/s^2$ arah translasi dan $1,86 \text{ rad}/s^2$ arah rotasi. Dari hasil eksperimen dan simulasi tersebut didapatkan grafik dengan trend yang memiliki kemiripan akan tetapi mempunyai nilai respon percepatan yang berbeda jauh. Hal ini diakibatkan karena data yang didapatkan hasil dari simulasi merupakan kondisi ideal tanpa adanya faktor-faktor yang dapat mempengaruhi dalam memperoleh data, sementara hasil eksperimen merupakan data yang diperoleh dari pengujian secara langsung, yang dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor dari peralatan, alat ukur yang digunakan, lingkungan atau faktor dari manusia itu sendiri.

Dari latar belakang penelitian tersebut maka dapat disimpulkan bahwa masih terdapat kekurangan yang dibuktikan dengan hasil dari eksperimen dan simulasi yang berbeda. Hal itu mendasari pada penelitian ini untuk dilakukan perbaikan agar nilai dari hasil simulasi dan eksperimen dapat akurat dan eror yang tidak terlalu besar. Pada hasil eksperimen dengan simulasi tanpa penambahan CPVA terjadi perbedaan nilai respon percepatan yang teramat jauh, hal ini mengidentifikasikan masih ada kekurangan pada rangka simulator yang belum rigid. Getaran yang diakibatkan oleh gaya eksitasi dari motor tidak tersalurkan secara menyeluruh ke flat datar sebagai tempat peletakan CPVA melainkan tersalurkan pula pada rangka yang ikut menerima energi getaran yang cukup besar dari gaya eksitasi dari motor. Pada penelitian ini akan difokuskan pada perbaikan rangka alat simulator dengan penambahan mekanisme CPVA yang akan divalidasi antara

hasil simulasi dan hasil eksperimen menggunakan metode uji T. Variasi yang diberikan yaitu variasi frekuensi yang diberikan (5,1 Hz, 5,7 Hz, 6,1 Hz), jarak penempatan alat CPVA pada simulator getaran (0 cm, 10 cm, dan 20 cm) dari titik pusat massa utama alat simulator getaran dan jumlah variasi *piezoelectric* yang digunakan (8 buah, 10 buah dan 12 buah).

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas dapat dirumuskan permasalahan pada penelitian ini adalah;

1. Bagaimana memodelkan validasi sistem dinamis dari simulator getaran dengan mekanisme *CPVA*?
2. Bagaimana pengaruh variasi frekuensi kerja terhadap getaran yang dihasilkan oleh sistem utama?
3. Bagaimana pengaruh variasi jarak peletakan *CPVA* dari titik tengah massa utama terhadap getaran yang diredam?
4. Bagaimana pengaruh variasi jumlah dari *piezoelectric* yang digunakan terhadap energi listrik yang dihasilkan?
5. Bagaimana hasil validasi antara eksperimen dan simulasi setelah dilakukan perbaikan rangka?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan agar penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan, adalah sebagai berikut:

1. Parameter yang divariasikan hanya frekuensi motor, jarak peletakan *CPVA* terhadap titik tengah massa utama, dan jumlah *piezoelectric* yang digunakan.
2. Nilai kekakuan pegas yang digunakan disesuaikan dengan ketersediaan dipasaran.
3. Defleksi pada meja diabaikan.
4. Getaran pada meja hanya dianalisa pada gerak translasi dan rotasi.

1.4. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mendapatkan model validasi dinamis dari simulator getaran dengan mekanisme *CPVA*.
2. Mengetahui pengaruh variasi frekuensi kerja terhadap getaran yang dihasilkan oleh sistem utama.
3. Mengetahui pengaruh variasi jarak peletakan *CPVA* dari titik tengah massa utama terhadap getaran yang diredam.
4. Mengetahui pengaruh variasi jumlah *piezoelectric* yang digunakan terhadap listrik yang dihasilkan.
5. Mengetahui hasil validasi dari percobaan eksperimen dan simulasi setelah dilakukan perbaikan rangka dari alat simulator.

1.5. Manfaat

Manfaat dari penelitian adalah:

1. Membantu mahasiswa untuk lebih memahami konsep *DVA* dan *energi harvesting*
2. Dapat dijadikan sebagai referensi untuk penelitian yang berhubungan dengan *energi harvesting* dengan memanfaatkan mekanisme *DVA*.
3. Dapat dijadikan sebagai media ajar sumber energi listrik alternatif.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

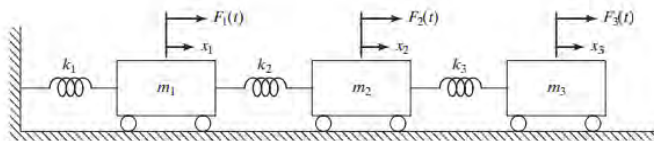
DASAR TEORI & TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

2.1.1 Derajat Kebebasan (*Degree Of Freedom*)

Derajat kebebasan adalah jumlah koordinat bebas (*independent coordinates*) yang dibutuhkan untuk menggambarkan posisi dari sistem secara lengkap terhadap suatu referensi yang dianggap diam. Secara garis besar derajat kebebasan dapat dibagi menjadi dua, yaitu satu derajat kebebasan (*single of freedom*) untuk sistem yang gerakannya dapat digambarkan dengan satu koordinat dan multi derajat kebebasan (*multi degree of freedom*) untuk sistem yang gerakannya digambarkan oleh lebih dari satu koordinat.

Pada perancangan ini akan digunakan sistem *Multi Degree of Freedom*. Persamaan gerak untuk *Multi Degree of Freedom* (M.D.O.F) secara umum diturunkan dari Hukum Newton kedua. Karena sistem MDOF memiliki penyelesaian aljabar yang kompleks, maka digunakan matriks untuk merepresentasikan sistem MDOF. Secara sederhana, sistem MDOF dapat dimodelkan melalui sistem massa-pegas yang ditarik oleh gaya $F_1(t)$, $F_2(t)$, dan $F_3(t)$ pada gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Sistem *undamped* dengan 3 DOF^[1]

Dari gambar 2.1 di atas, maka akan didapatkan matriks dari persamaan gerak dengan menggunakan Hukum Newton kedua yang diberikan untuk setiap massa.

$$m_i \ddot{x}_i + k_{ixi} = \sum_j F_{ij} \quad (2.1)$$

Persamaan 2.2 di atas terdiri dari $j=1$, $j=2$ dan $j=3$ sehingga dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad [k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}, \quad [F] = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

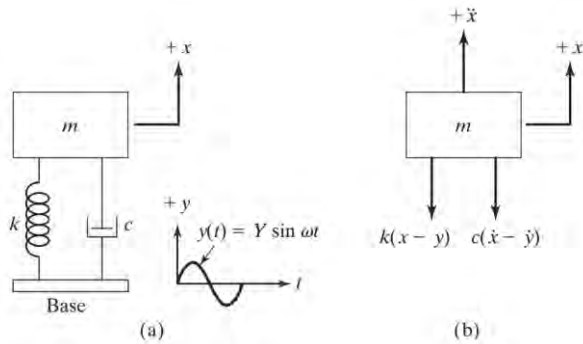
Dengan menyubstitusikan persamaan (2.1) ke persamaan (2.2), maka akan didapatkan:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix}$$

2.1.2 Response of a Damped Sistem Under the Harmonic Motion of the Base

Kadang-kadang *base* atau landasan dari sistem pegas-massa-peredam mengalami gerak harmonik, seperti ditunjukkan pada Gambar. 2.2 (a). Dimana $y(t)$ menunjukkan perpindahan *base* dan $x(t)$ perpindahan massa dari posisi keseimbangan statis pada saat t . Maka pemanjangan dari pegas adalah $x - y$ dan kecepatan relatif antara dua ujung peredam adalah $\dot{x} - \dot{y}$. Dari *free body diagram* ditunjukkan pada Gambar. 2.2(b), kita memperoleh persamaan gerak:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.4)$$



Gambar 2.2 *Base Excitation*^[6]

Jika $y(t) = Y \sin \omega t$, Eq (2.4) menjadi

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ky + c\dot{y} = kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t = A \sin(\omega t - \alpha) \quad (2.5)$$

Dimana

$$A = Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$$

Dan

$$\alpha = \tan^{-1} \left[-\frac{c\omega}{k} \right].$$

Menunjukkan bahwa memberikan eksitasi ke *base* setara dengan menerapkan gaya harmonik besarnya A ke massa. Respon steady-state dari massa, $x_p(t)$ dapat dinyatakan dengan :

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{[(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2]^{1/2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.6)$$

Dimana

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right)$$

2.1.3 *Dynamic Vibration Absorber (DVA)*

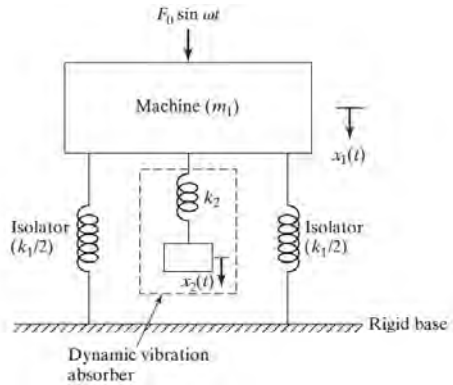
Dynamic Vibration Absorber merupakan alat mekanis digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan getaran yang tidak diinginkan. *DVA* Ini terdiri dari massa dan kekakuan lain yang melekat pada massa utama yang perlu dilindungi dari getaran. Dengan demikian massa utama dan massa absorber yang terpasang merupakan sistem dua derajat kebebasan, maka getaran *absorber* akan memiliki dua frekuensi alami.

Penyerap getaran pada umumnya digunakan dalam mesin yang beroperasi pada kecepatan konstan, karena getaran absorber diatur untuk satu frekuensi tertentu dan berlaku efektif hanya melalui frekuensi pita sempit. Contoh aplikasi umum dari peredam getaran yaitu pada alat dengan gerak maju mundur, seperti sanders, gergaji, dan compactor, yang berjalan pada kecepatan konstan (untuk konsumsi bahan bakar minimal). Dalam sistem ini, peredam getaran membantu menyeimbangkan kekuatan gerak maju mundur (*reciprocating*).

Tanpa peredam getaran, gaya dari gerak maju mundur (*reciprocating force*) tidak seimbang, dan bisa membuat perangkat tidak mungkin untuk terus dikontrol. peredam getaran juga digunakan pada transmisi Energi tinggi. Pada kasus ini, peredam getaran dinamis, berupa perangkat berbentuk beban, digantung pada motor untuk mengurangi dampak getaran yang diterima oleh motor.

A. *Undamped Dynamic Vibration Absorber*

Ketika kita hubungkan massa m_2 ke sebuah mesin dengan massa m_1 menggunakan pegas yang memiliki kekakuan k_2 , hasil dari sistem 2 *Degree Of Freedom* (DOF) terlihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.3 Undamped dynamic absorber^[6]

persamaan gerak antara m_1 dan m_2 dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = F_0 \sin \omega t \quad (2.7)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (2.8)$$

Dengan asumsi penyelesaian harmonik,

$$x_j(t) = X_j \sin \omega t, \quad j = 1, 2 \quad (2.9)$$

Didapatkan *steady state* amplitude dari m_1 dan m_2 ,

$$X_1 = \frac{(k_2 - m_2 \omega^2) F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (2.10)$$

$$X_2 = \frac{k_2 F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (2.11)$$

Untuk membuat amplitude m_1 , $X_1=0$ maka pada persamaan (2.10) harus sama dengan nol. Diperoleh

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (2.12)$$

Jika mesin sebelum ditambahkan *DVA* beroperasi pada daerah dekat dengan resonansinya $\omega^2 \approx \omega_1^2 = k_1/m_1$. Maka persamaannya menjadi

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} = \frac{k_1}{m_1} \quad (2.13)$$

Amplitudo dari mesin pada saat dioperasikan merupakan frekuensi resonansi yang sebenarnya, akan menjadi 0 dengan mendapatkan

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k_1}, \quad \omega_1 = \left(\frac{k_1}{m_1}\right)^{1/2}$$

Sebagai frekuensi natural dari mesin atau sistem utama, dan

$$\omega_2 = \left(\frac{k_2}{m_2}\right)^{1/2} \quad (2.14)$$

Sebagai frekuensi natural dari *absorber* atau sistem tambahan, persamaan (2.10) dan (2.11) dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (2.15)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (2.16)$$

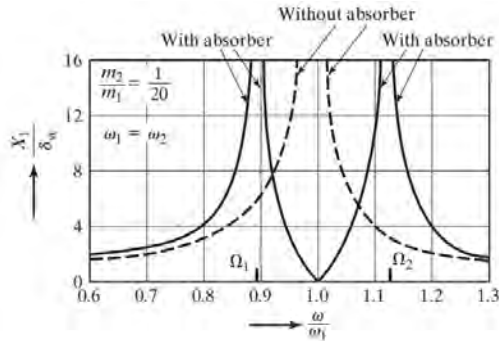
Gambar 2.4 menunjukkan variasi dari amplitudo mesin (X_1/δ_{st}) terhadap kecepatan mesin (ω/ω_1). Ketika $X_1 = 0$ pada $\omega = \omega_1$. Pada frekuensi ini persamaan (2.16) menjadi,

$$X_2 = -\frac{k_1}{k_2} \delta_{st} = -\frac{F_0}{k_2} \quad (2.17)$$

Hal ini menunjukkan bahwa gaya pegas berlawanan dengan gaya eksitasi dan berusaha untuk meniadakan gaya eksitasi sehingga X_1 berkurang menjadi 0. Ukuran dari *DVA* didapatkan dari persamaan (2.17) dan (2.13):

$$k_2 X_2 = m_2 \omega^2 X_2 = -F_0 \quad (2.18)$$

Sehingga nilai dari k_2 dan m_2 tergantung pada nilai X_2 :



Gambar 2.4 *Effect of undamped vibration absorber on response of machine*^[6]

Pada gambar 2.4 Penambahan *DVA* menambahkan dua frekuensi resonansi Ω_1 dan Ω_2 pada respon mesin, dimana amplitudo dari mesin tidak terhingga. Dalam praktis, frekuensi operasional ω harus berada jauh dari frekuensi Ω_1 dan Ω_2 . Nilai dari Ω_1 dan Ω_2 dapat diperoleh dengan membuat denominator persamaan (2.9) menjadi 0 dimana:

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{k_2}{m_2} \frac{m_2}{m_1} \frac{m_1}{k_1} = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \quad (2.19)$$

Sehingga persamaan (2.15) Menjadi:

$$\left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^4 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \left[1 + \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right] + 1 = 0 \quad (2.20)$$

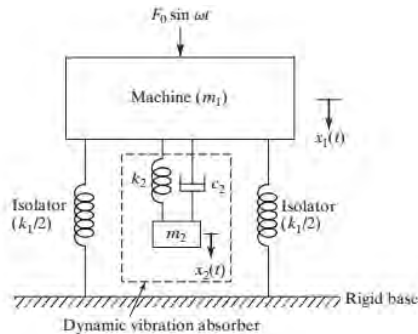
Akar dari persamaan (2.20) Menjadi:

$$\left\{ \frac{\left(\frac{\Omega_1}{\omega_2} \right)^2}{\left(\frac{\Omega_2}{\omega_2} \right)^2} \right\} = \frac{\left\{ \left[1 + \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right] \mp \left\{ \left[1 + \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right]^2 - 4 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right\}^{1/2} \right\}}{2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2} \quad (2.21)$$

Dimana persamaan 2.21 merupakan fungsi dari (m_2/m_1) dan (ω_2/ω_1) .

B. Damped Dynamic Vibration Absorber

Jenis *undmped DVA* menghilangkan puncak resonansi pada kondisi tanpa *DVA* dalam grafik respon dari mesin tetapi dua puncak baru muncul sehingga mesin mengalami amplitudo yang besar saat puncak pertama selama start-up dan stopping. Amplitudo mesin dapat dikurangi dengan menambahkan damped vibration absorber seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Damped dynamic vibration absorber*^[6]

Persamaan gerak dari kedua massa tersebut adalah sebagai berikut :

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_2(x_1 - x_2) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0 \sin \omega t \quad (2.22)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (2.23)$$

Dengan asumsi penyelesaian menjadi

$$x_j(t) = X_j e^{i\omega t}, \quad j = 1, 2 \quad (2.24)$$

Penyelesaian *steady state* dari persamaan 2.22 Dan 2.23 Menjadi:

$$X_1 = \frac{F_0(k_2 - m_2\omega^2 + ic_2\omega)}{[(k_1 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - m_2k_2\omega^2] + i\omega c_2(k_1 - m_1\omega^2 - m_2\omega^2)} \quad (2.25)$$

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 + i\omega c_2)}{(k_2 - m_2\omega^2 + i\omega c_2)}$$

Dimana :

$\mu = m_2/m_1 = \text{Mass ratio} = \text{Absorber mass /main mass}$

$\delta_{st} = F_0/k_1 = \text{Static deflection of the sistem}$

$\omega_a^2 = k_2/m_2 = \text{Square of natural frekuensi of the absorber}$

$\omega_n^2 = k_1/m_1 = \text{Square of natural frekuensi of main mass}$

$f = \omega_2/\omega_1 = \text{Ratio of natural frekuensi}$

$g = \omega/\omega_n = \text{forced frekuensi ratio}$

$c_c = 2m_2\omega_n = \text{Critical damping constant}$

$\zeta = c_2/c_c = \text{Damping ratio}$

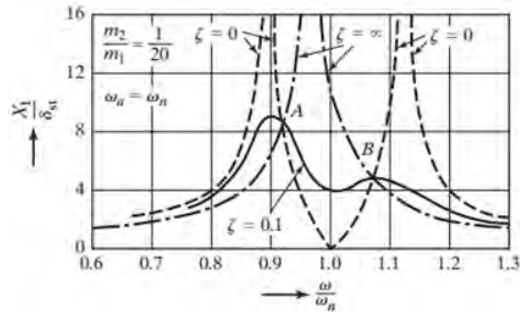
Nilai X_1 dan X_2 adalah,

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2(g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

Dan

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2(g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.27)$$

Persamaan 2.26 Menunjukkan nilai amplitudo getaran dari massa utama merupakan fungsi dari μ, f, g , dan ζ . Grafik $\left| \frac{X_1}{\delta_{st}} \right|$ terhadap *forced frekuensi ratio* $g = \omega/\omega_n$ ditunjukkan pada gambar 2.5 Dengan $f = 1$, $\mu = 1/20$ dan variasi nilai ζ .



Gambar 2.6 Pengaruh *damped vibration absorber on the response of machine*^[6]

Jika redaman sama dengan nol ($c_2 = \zeta = 0$), maka resonansi terjadi pada dua frekuensi resonansi tak teredam dari sistem. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2.6 Ketika redaman menjadi tidak terhingga ($\zeta = \infty$), kedua massa, m_1 dan m_2 , bekerja bersamaan, dan sistem seolah-olah menjadi 1-DOF dengan massa $(m_1 + m_2) = (1/20)m$ dan kekakuannya k_1 . Dalam kasus ini, resonansi terjadi dengan $X_1 \rightarrow \infty$ pada

$$g = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu}} = 0.9759$$

sehingga puncak X_1 menjadi tak terhingga untuk $c_2 = 0$ dan $c_2 = \infty$, pada daerah diantara batas atas dan bawah, puncak X_1 bernilai minimum.

2.1.4 Dasar Teori *Piezoelectric Material*

A. *Piezoelectric*

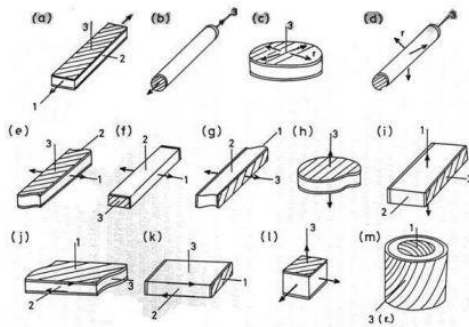
Piezoelectric adalah suatu material yang biasanya terbuat dari kristal batuan, keramik, termasuk tulang dan polimer yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan potensial listrik. Potensial listrik ini merupakan respon dari material *piezoelectric*

yang diberi Energi dengan cara ditekan. Nilai koefisien muatan piezoelektrik berada pada rentang 1–100 pico coulomb/Newton.

B. Karakteristik Material *Piezoelectric*

Efek *piezoelektrik* terjadi jika medan listrik terbentuk ketika material dikenai tekanan mekanik. Pada saat medan listrik melewati material, molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik, dihasilkan dipole yang terinduksi dengan molekul atau struktur kristal materi. Penyesuaian molekul akan mengakibatkan material berubah dimensi.

Fenomena tersebut dikenal dengan *electrostriction*. Material *piezoelectric* memiliki berbagai jenis yang dibedakan menurut bentuk, sifat mekanik, fungsi, material yang digunakan, energi bangkitan dan faktor lain yang mempengaruhi kinerjanya. Beberapa bentuk dan macam-macam dari *piezoelectric* dapat dilihat pada gambar 2.7.








Gambar 2.7 contoh bentuk *piezoelectric*^[1]

Voltase bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* disebabkan oleh adanya muatan yang berbeda-beda antar partikel dalam *piezoelectric* itu sendiri. Ketika material *piezoelectric* tersebut dikenai gaya eksternal atau

mengalami defleksi, maka jarak antar partikel akan berubah. Perubahan jarak antar partikel tersebut menyebabkan munculnya beda potensial yang disebut dengan *Pull-in Voltage*. Besar dari *Pull-in Voltage* dipengaruhi oleh besarnya energi mekanik yang diterima material *piezoelectric*, jenis material, dan kapasitansi material. Karakteristik energi bangkitan dari material *piezoelectric* dapat dilihat di dalam Tabel 2.1 berikut ini :

Tabel 2. 1 Energi bangkitan, *displacement* dan kapasitansi pada material *piezoelectric*^[1]

Active Mode (L: length, W: width, T: thickness, D: diameter)	Generated Voltage, V	Displacement, Δl (ΔT)	Capacitance, C
Transverse length mode: $L \gg W \gg T$	$V = \frac{g_{31} F}{b}$	$\Delta l = \frac{d_{31} L}{b} V$	$C = \frac{\epsilon_{33}^T L W}{t}$
			
Thickness extension mode: $D \gg T$	$V = \frac{g_{33} F}{\pi D^2}$	$\Delta T = d_{33} V$	$C = \frac{\pi \epsilon_{33}^T D^2}{4 t}$
			
Radial mode: $D \gg T$	Not applied	$\Delta D = \frac{d_{31} D}{t} V$	$C = \frac{\pi K_{31}^2 D^2}{4}$
			
Longitudinal mode: $L \gg W \gg T$	$V = \frac{g_{33} F}{\pi D^2}$	$\Delta L = d_{33} V$	$C = \frac{\pi D^2}{4 t} \epsilon_{33}^T$
			
Thickness shear mode: $W \gg T, L \gg T$	$V = \frac{g_{24} F}{W}$	$\Delta s = d_{24} V$	$C = \frac{2 W}{t} K_{24}^2 \epsilon_0$
			

Note: F is the force and ϵ_{ij}^T is dielectric permittivity of the material at constant stress in direction 3, K_{ij}^2 is relative dielectric constant ($K_{ij}^2 = d_{ij}^2/\epsilon_{ij}^T$), and ϵ_0 is dielectric permittivity in vacuum.

Energi bangkitan akan berbeda tergantung dari bentuk *piezoelectric*, besarnya energi bangkitan tersebut dipengaruhi oleh sifat mekanik dari *piezoelectric* yang dipilih. Energi bangkitan juga dipengaruhi oleh energi atau usaha mekanik yang diterima oleh material *piezoelectric*.

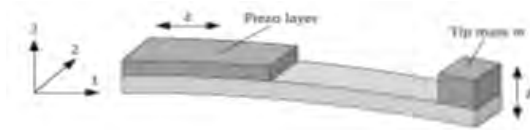
Berikut merupakan tabel yang menunjukkan sifat mekanik untuk beberapa material *piezoelectric*.

Tabel 2. 2 Sifat Mekanik Beberapa Material *Piezoelectric*^[1]

Property	Units	PVDF Film	PZT	BaTiO ₃
Density	103 kg/m ³	1.78	7.5	5.7
Relative Permittivity	ϵ/ϵ_0	12	1200	1700
d ₃₁ Constant	(10-12) C/N	23	110	78
g ₃₁ Constant	(10-3) Vm/N	216	10	5
k ₃₁ Constant	% at 1 KHz	12	30	21
Acoustic Impedance	(106) kg/m ³ .sec	2.7	30	30

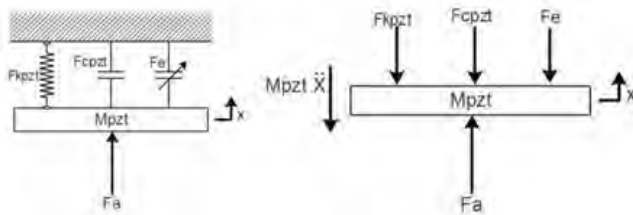
C. *Cantilever Piezoelectric*

Material *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai pegas dengan bentuk *cantilever beam* yang dilengkapi dengan massa pada ujungnya. Defleksi yang terjadi adalah dari arah 3 atau searah dengan sumbu z, dan regangan yang terjadi adalah pada arah 1 atau pada arah sumbu x, sedangkan gaya yang diterima oleh *piezoelectric* adalah pada arah 3 atau pada arah sumbu z. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 *Cantilever piezoelectric*^[1]

Ketika suatu gaya luar diberikan pada material *piezoelectric* maka material *piezoelectric* tersebut akan mengalami defleksi. Untuk mendapatkan persamaan gerak dari material *piezoelectric* maka perlu dianalisa *free body diagram* seperti ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Free body diagram* dari *cantilever piezoelectric*^[1]

Keseimbangan gaya:

$$F_a = M_{pzt} \ddot{x} + F_{C_{pzt}} + F_{k_{pzt}} + F_e$$

$$F_a(t) = M_{pzt} \ddot{x}(t) + C_{pzt} \dot{x}(t) + k_{pzt}(t) + (t) \quad (2.28)$$

keterangan:

F_a = gaya eksitasi (N)

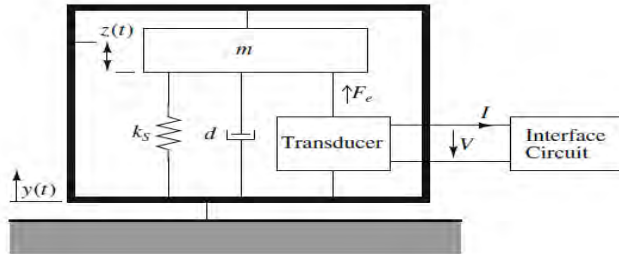
M_{pzt} = massa *piezoelectric* (kg)

C_{pzt} = damping dari *cantilever beam* (N.s/m)

k_{pzt} = konstanta pegas *piezoelectric* (N/m)

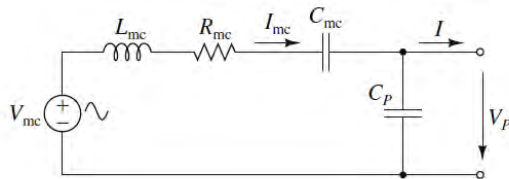
Θ = *coupling factor*

Untuk model dinamis pemanen energi kinetik dari *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai susunan massa pegas yang diberikan gaya harmonis. Susunan massa pegas tersebut dilengkapi dengan rangkaian elektrik pemanen energi. Model tersebut dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Model permanen energi kinetic menggunakan *cantilever piezoelectric*^[1]

Dari gambar 2.10 di atas maka didapatkan rangkaian listrik ekuivalen yang sesuai. Rangkaian listrik tersebut dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 rangkaian listrik pemanen energi kinetik^[1]

Persamaan rangkaian listrik ekuivalen pada gambar 2.10 di atas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (2.29)$$

dengan:

$$V_{mc} = \frac{F_i}{\Gamma} \quad L_{mc} = \frac{M}{\Gamma^2} \quad R_{mc} = \frac{d_p}{\Gamma^2} \quad C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p}$$

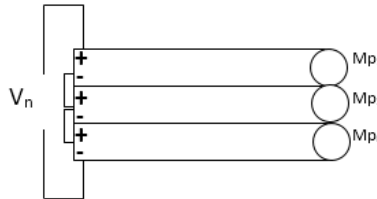
$$\Gamma = \sqrt{k_{31} k_p C_p}$$

dimana :

- F_i = Gaya lendutan dari eksitasi (N)
- M = Massa (Kg)
- d_p = Konstanta damping ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)
- k_p = Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)
- C_p = Kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

D. Susunan *Piezoelectric*

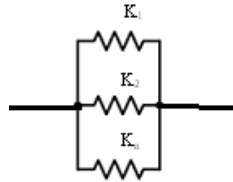
Piezoelectric dapat disusun secara seri dan paralel. Susunan dari *piezoelectric* ini dapat merubah sifat mekanik dan elektrik dari *piezoelectric* yang bergantung dari bentuk susunan dari *piezoelectric* tersebut. Susunan material *piezoelectric* secara paralel dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Susunan paralel material *piezoelectric*^[1]

Karena *piezoelectric* disusun secara paralel, maka konstanta pegas dari material *piezoelectric* juga akan disusun secara paralel seperti yang terlihat pada gambar 2.13. Sehingga

material *piezoelectric* yang disusun secara paralel akan memiliki sifat mekanik sebagai berikut:



Gambar 2.13 Konstanta pegas disusun paralel^[1]

Untuk satu material *piezoelectric*

$$F_k = K \cdot x \quad (2.30)$$

Untuk *piezoelectric* yang disusun secara paralel dengan jumlah n

$$F_k = K_{eq} \cdot x \quad (2.31)$$

dengan:

$$K_{eq} = n \cdot K$$

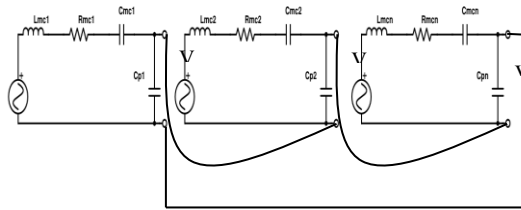
Untuk keseluruhan jumlah massa M_p dapat dirumuskan dengan:

$$M_{eq} = M_1 + M_2 + \dots + M_n$$

atau,

$$M_{eq} = n \cdot M \quad (2.32)$$

Selanjutnya, tinjauan elektris untuk susunan material *piezoelectric* secara seri dapat dilihat seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 *Piezoelectric* disusun secara seri^[1]

Voltase bangkitan yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah

$$V_n = Vp_1 + Vp_2 + \dots + Vp_n \quad (2.33)$$

Jika $Vp_1 = Vp_2 = Vp_n$, maka:

$$V_n = n \cdot V_1 \quad (2.34)$$

Dan arus yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah

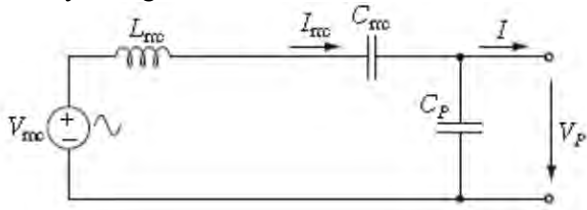
$$I_n = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2.35)$$

Dari persamaan pada rangkaian seri dapat disimpulkan bahwa dengan menyusun *piezoelectric* secara seri, maka voltase yang dihasilkan akan semakin meningkat. Sedangkan untuk arus yang dihasilkan akan tetap seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

E. Perhitungan Teoritis Energi Listrik Bangkitan *Piezoelectric*

Selain melalui percobaan eksperimen, dapat juga perhitungan teoritis energi listrik bangkitan yang dapat dihasilkan

oleh *piezoelectric*. Energi listrik tersebut terdiri dari voltase, arus listrik, dan daya bangkitan.



Gambar 2.15 Sirkuit elektromagnetik pada *cantilever piezoelectric*^[1]

Untuk voltase bangkitan yang dihasilkan oleh *piezoelectric* dapat dirumuskan dengan :

$$V_p = \frac{3d_{31}E_pW_p t}{4c} x_p \quad (2.36)$$

Keterangan :

V_p : Voltase bangkitan *piezoelectric* (Volt)

d_{31} : *Voltage constant* (C/N)

E_p : Modulus elastisitas (N/m²)

W_p : Lebar *piezoelectric* (m)

t : Tebal *piezoelectric* (m)

c : *piezoelectric capacitance*(farad)

x_p : defleksi *piezoelectric* (m)

Sedangkan untuk arus listrik bangkitan yang dihasilkan oleh *piezoelectric* yang digunakan pada eksperimen ini dapat dirumuskan dengan:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{c_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (2.37)$$

$$I_{mc} = \frac{1}{L_{mc}} \left(V_{mc} - R_{mc} I_{mc} - \frac{1}{c_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \right) \quad (2.38)$$

Dimana :

$$V_{mc} = \frac{F_i}{\Gamma} \quad L_{mc} = \frac{M}{\Gamma^2} \quad R_{mc} = \frac{d_p}{\Gamma^2} \quad C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p}$$

$$\Gamma = \sqrt{k_{31}k_p C_p}$$

Keterangan :

M : Massa (kg)
 d_p : Konstanta damping ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)
 k_p : Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)
 C_p : Kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

Sehingga daya bangkitan dari *piezoelectric* dapat dirumuskan dengan:

$$p = V_p I_{mc}$$

Keterangan :

p : Daya bangkitan *piezoelectric* (Watt)
 I_{mc} : Arus bangkitan *piezoelectric* (Ampere)

2.1.5 Validasi

Validitas adalah suatu ukuran yang menunjukkan tingkat-tingkat kevalidan atau kesahihan sesuatu instrumen (Arikunto, 2002: 144). Sebuah instrumen dikatakan valid apabila mampu mengukur apa yang diinginkan dan dapat mengungkap data dari variabel yang diteliti secara tepat. Tinggi rendahnya validitas instrumen menunjukkan sejauh mana data yang terkumpul tidak menyimpang dari gambaran tentang validitas yang dimaksud. Suatu penelitian dapat dikatakan memiliki validitas yang tinggi jika penelitian tersebut menjalankan fungsi ukurnya, atau memberikan hasil ukur yang tepat dan akurat sesuai dengan maksud pada penelitian tersebut.

Suatu penelitian yang menghasilkan data yang tidak relevan dengan tujuan diadakannya pengukuran dikatakan sebagai penelitian yang memiliki validitas rendah. Dalam penelitian ini digunakan *Independent sample t-test*

1. *Independent sample t-test*

Uji *independent* ditujukan untuk mengetahui perbedaan rata-rata dua populasi/kelompok data yang independen. Uji *independent* diasumsikan dengan pengambilan data antara kelompok pertama (n_1) dan kelompok kedua (n_2) diasumsikan pengambilan data kurang dari 30 (n_1 dan $n_2 < 30$)^[7]. Hipotesa yang digunakan sebagai berikut:

$$H_o : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_i : \mu_1 \neq \mu_2$$

Dengan H_o mempunyai arti bahwa terdapat hubungan antara distribusi data kelompok pertama dan kedua, sementara H_i merupakan tidak terdapat hubungan antara data rata-rata kelompok pertama dan kedua.

Uji T *independen* ini memiliki asumsi/syarat yang meski dipenuhi, yaitu:

- a. Data berdistribusi normal
- b. Kedua kelompok data independen
- c. Variabel yang dihubungkan berbentuk numerik dan kategorik (hanya dengan 2 kelompok)

2. Rumus *Independent sample t-test*

$$t_{hit} = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\frac{SS_1 + SS_2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

M_1 = rata-rata hasil kelompok 1

M_2 = rata-rata hasil kelompok 2

SS_1 = *sum of square* kelompok 1

SS_2 = *sum of square* kelompok 2

n_1 = jumlah pengambilan sample kelompok 1

n_2 = jumlah pengambilan sample kelompok 2

Dimana:

$$M_1 = \frac{\sum X_1}{n_1} \quad SS_1 = \left(\frac{(\sum X_1^2)}{n_1} - \bar{x}_1^2 \right)^{0,5}$$

$$M_2 = \frac{\sum X_2}{n_2} \quad SS_1 = \left(\frac{(\sum X_2^2)}{n_2} - \bar{x}_2^2 \right)^{0,5}$$

3. Interpretasi

a. Untuk menginterpretasikan t-test terlebih dahulu harus ditentukan :

- Nilai signifikansi α
- Interval *confidence* = $1 - \alpha$
- Df (*degree of freedom*) = $N - k$, khusus untuk independent t-test Df = $(n_1 + n_2) - 2$

b. Bandingkan nilai $t_{hit} - t_{tab}$

c. Apabila :

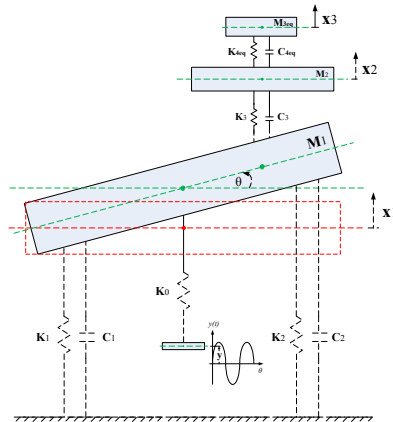
$t_{hit} > t_{tab} \rightarrow$ berbeda signifikansi (H_0 ditolak)

$t_{hit} < t_{tab} \rightarrow$ tidak berbeda secara signifikansi (H_0 diterima)

2.2. Tinjauan Pustaka

Telah banyak dilakukan penelitian sejenis yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini mengenai penggunaan piezoelektrik untuk *energi harvesting* yang berasal dari getaran pada suatu sistem. Salah satunya yang dilakukan oleh Imam Safei^[1] dan Faiz Imawan Danaputra^[2]. Dalam jurnalnya dijelaskan bahwa penelitian tersebut melakukan eksperimen rancang bangun serta simulasi dari mekanisme *cantilever piezoelectric vibration absorber* (CPVA) sebagai peredam dan pembangkit listrik. variasi yang diberikan antara lain variasi frekuensi yang diberikan

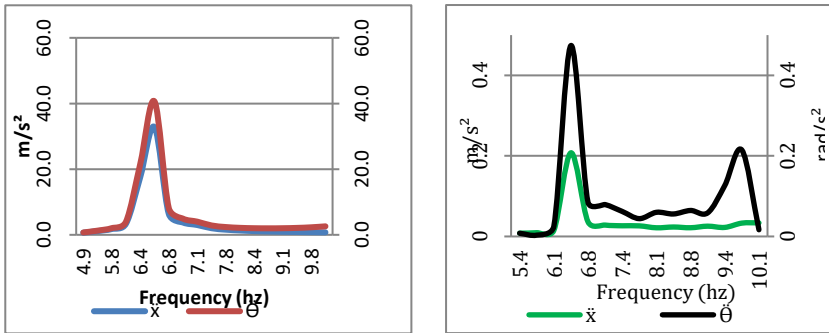
5,8 Hz, 6,4 Hz, 7,1 Hz, variasi jarak penempatan CPVA dari titik pusat massa sejauh 0 cm, 10 cm, 20 cm dan variasi jumlah *piezoelectric* yang digunakan 4, 6, dan 8 buah. Model dinamis dengan sistem CPVA sebagai berikut:



Gambar 2.16 Model dinamis dari sistem massa utama dengan penambahan CPVA^[2]

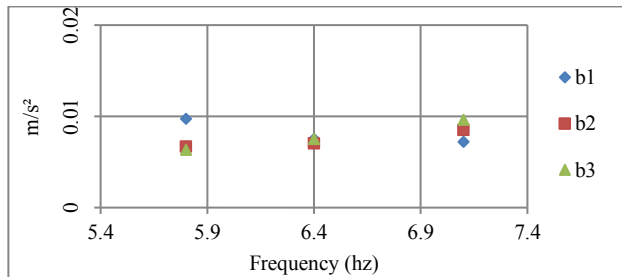
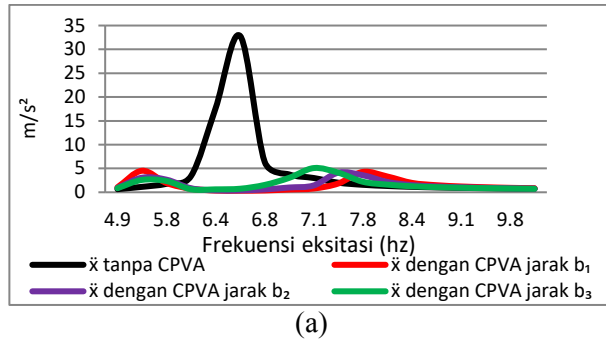
Pada gambar 2.16 Permodelan dinamis dari sistem pada massa 1 (M_1) terlihat bahwa sistem mempunyai dua *degree of freedom* arah translasi dan rotasi. Untuk gerak rotasi pada penelitian ini diakibatkan oleh perbedaan konstanta kekakuan pegas pada sisi kiri dan kanan sistem utama. Sementara untuk massa 2 (M_2) hanya mempunyai satu *degree of freedom* arah translasi.

Hasil dari hubungan analisa simulasi dengan eksperimen ketika tanpa diberikan mekanisme CPVA didapat hasil sbb:



Gambar 2.17 Grafik perbandingan respon sistem utama tanpa CVPA (a) data hasil simulasi (b) data hasil eksperimen^[1]

Pada gambar 2.17 diatas memperlihatkan respon getaran percepatan arah translasi dan rotasi pada beberapa perubahan frekuensi eksitasi yang diberikan pada sistem. Untuk gambar 2.17 (a) merupakan grafik respon sistem utama tanpa CPVA yang didapatkan dari hasil simulasi simuling dengan memasukan nilai parameter-parameter yang peroleh dari hasil eksperimen. Garis yang berwarna biru merupakan gambaran respon percepatan arah translasi dan yang berwarna merah merupakan respon percepatan arah rotasi. Jika dibandingkan dengan hasil dari eksperimen diperoleh suatu kemiripan antara ke dua hasil tersebut. Lonjakan respon getaran tertinggi terjadi pada frekuensi 6,4 Hz. Terlihat pada grafik bahwa nilai respon getaran arah rotasi selalu lebih tinggi dibandingkan respon getaran arah translasi. Namun untuk data respon yang diperoleh dari hasil simulasi jauh lebih besar dibandingkan data yang diperoleh secara eksperimen. Hal ini diakibatkan karena data yang didapatkan hasil dari simulasi merupakan kondisi ideal tanpa adanya faktor-faktor yang dapat mempengaruhi dalam memperoleh data, sementara hasil eksperimen merupakan data yang diperoleh dari pengujian secara langsung, yang dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor dari peralatan, alat ukur yang digunakan, lingkungan atau faktor dari manusia itu sendiri. Hasil dari hubungan analisa simulasi dengan eksperimen ketika diberikan mekanisme CPVA didapat hasil sebagai berikut:

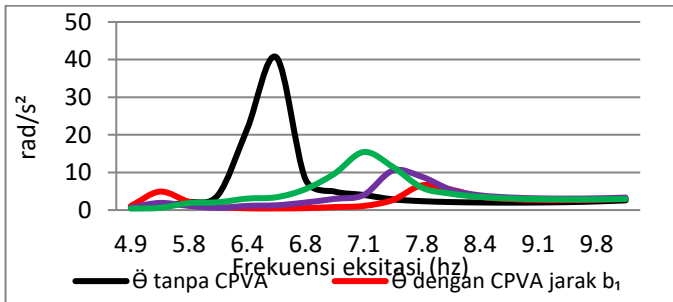


(b)

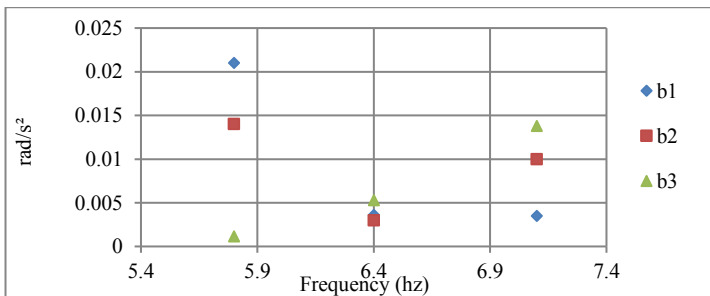
Gambar 2.18 Grafik perbandingan respon dengan CPVA
(a) data hasil simulasi (b) data hasil eksperimen^[1]

Dari gambar 2.18 (a) garis merah untuk respon sistem arah translasi pada jarak peletakan CPVA sejauh b_1 , garis ungu untuk jarak b_2 dan garis hijau untuk jarak b_3 . dan (b) hasil respon grafik yang didapatkan memiliki kemiripan antara hasil simulasi dan eksperimen. Terlihat bahwa saat penambahan CVPA pada sistem utama mengakibatkan bertambahnya jumlah frekuensi natural pada sistem tersebut, namun pada frekuensi 6.4 Hz yang awalnya mengakibatkan getaran yang berlebih mengalami penurunan drastis, hal ini menandakan bahwa sistem CPVA mampu meredam getaran pada frekuensi natural awal sistem.

Dari grafik tersebut juga dapat diketahui pengaruh variasi peletakan CPVA sejauh b_1 , b_2 . Dan b_3 mengakibatkan perubahan pada frekuensi natural sistem. Hal ini tampak dari puncak respon sistem antara ketiga variasi tersebut terjadi pada frekuensi eksitasi yang berbeda. Semakin jauh jarak peletakan CPVA dari titik tengah massa utama mengakibatkan frekuensi natural sistem bergeser ke arah kiri. Kondisi ini juga terjadi pada grafik hasil pengujian secara eksperimen, sehingga dapat dikatakan bahwa data hasil eksperimen dengan data hasil simulasi memiliki trend garis yang mirip meski nilai yang diperoleh dari simulasi jauh diatas nilai yang diperoleh dari eksperimen.



(a)



(b)

Gambar 2.19 Grafik perbandingan respon sistem CPVA arah rotasi (a) pada simulasi (b) pada eksperimen^[1]

Gambar 2.19 (a) diatas merupakan grafik respon sistem utama dengan CPVA yang diperoleh dari hasil simulasi simulink dengan memasukkan nilai parameter-parameter yang diperoleh dari hasil eksperimen. Garis yang berwarna hitam merupakan gambaran respon percepatan sistem arah rotasi tanpa CPVA, garis merah untuk respon sistem arah rotasi pada jarak peletakan CPVA sejauh b_1 , garis ungu untuk jarak b_2 dan garis hijau untuk jarak b_3 . Jika dibandingkan dengan data hasil eksperimen pada gambar 2.20 (b), terdapat kemiripan antara data yang diperoleh secara eksperimen dengan data yang diperoleh secara simulasi.

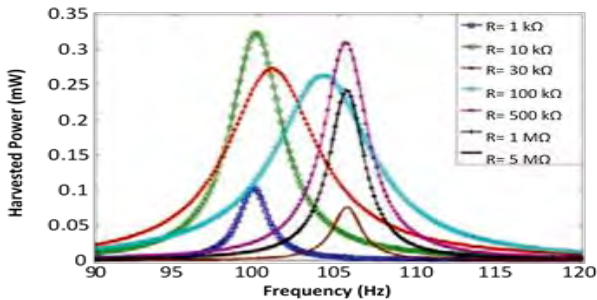
Posisi peletakan yang menghasilkan redaman yang paling tinggi pada jarak 10 cm , yang menghasilkan redaman arah translasi 96,63%, dan rotasi 99,37%. Dan nilai potensial listrik yang dapatkan akan semakin besar seiring pertambahan *piezoelectric* ketika 4 buah *piezoelectric* di bangkitkan 0,03V , 6 buah 0,04V dan 8 buah 0,05V.

Penelitian yang berkaitan tersebut sebelumnya pernah dilakukan oleh Sushanta Kundu^[3]. Dalam jurnalnya dibahas pemodelan *vibration energi harvesting* berupa sistem getaran yang terdiri dari pegas, massa, peredam, serta *cantilever piezoelectric* dengan massa pada bagian ujungnya. Energi pada material piezoelektrik yang digunakan untuk mengetahui energi listrik yang dapat dihasilkan, diperoleh pada sepanjang batang dengan input gaya eksitasi dalam bentuk *sinusoidal*.

Pada penelitian tersebut, hasil akhir dari penurunan persamaan secara matematis selanjutnya akan disimulasikan pada MATLAB dan akan dibandingkan dengan hasil dari analisa *finite element* menggunakan *software* COMSOL Multiphysics. Hasil yang diperoleh akan digunakan untuk

menentukan frekuensi resonansi, perpindahan massa piezoelektrik, serta daya yang dihasilkan.

Dengan tinjauan analisa lainnya, yaitu analisa pengaruh dari beban resistansi, dapat diketahui nilai daya yang dihasilkan oleh piezoelektrik dari pemodelan matematis dengan variasi beban resistansi seperti pada gambar 2.20.

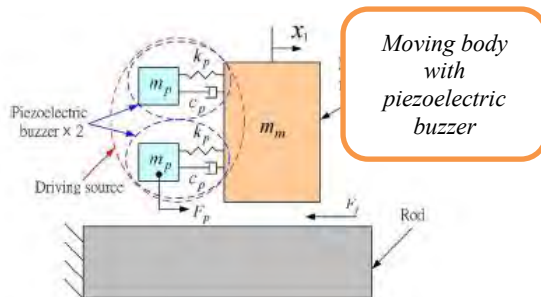


Gambar 2.20 Grafik daya terhadap frekuensi untuk beberapa beban resistansi yang berbeda dan diperoleh dengan pemodelan matematis^[3]

Berdasarkan gambar 2.20, daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh beban resistansi yang diberikan. Untuk memperoleh daya maksimum dari *energi harvester*, maka frekuensi eksitasi harus bernilai sama dengan frekuensi natural sistem yang bergetar, serta beban resistansi yang diberikan harus pada nilai optimal. Beban resistansi optimal untuk penyusunan piezoelektrik secara paralel diketahui besarnya 10,3 kΩ dengan daya yang dihasilkan 0,323 mW serta perpindahan dari massa ujung batang piezoelektrik sebesar 127 μm.

Penelitian juga telah dilakukan oleh W.M. Chen, T.S. Liu^[4]. Pada jurnal penelitiannya, dilakukan analisa

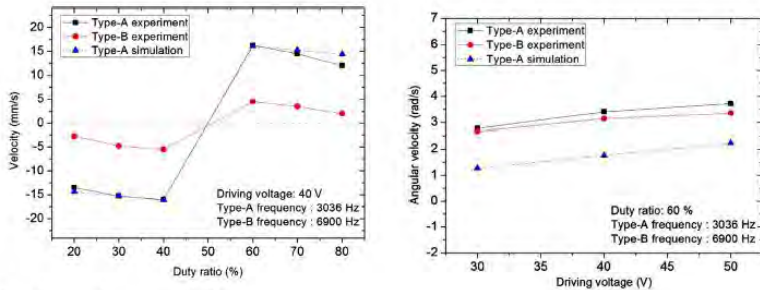
permodelan dan eksperimen validasi yang bertujuan untuk mengetahui gaya yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* actuator arah translasi dan rotasi dan kecepatan dari perpindahan *body*. Skema permodelan dari eksperimen dapat dilihat pada gambar 2.21.



Gambar 2.21 model mekanis dari *piezoelectric actuator*^[4]

Berdasarkan gambar 2.21, terlihat bahwa 2 buah material *piezoelectric* yang tersambung pada masaa utama body yang tertumpu pada cylinder pejal. Structure utama dapat diasumsikan sebagai *sistem single degree-of freedom*.

Hasil eksperimen dan simulasi menurut eksitasi *frekuensi*, respon *frekuensi* dan duty ratio dari penggerak voltage didapatkan data grafik sebagai berikut:



Gambar 2.22 hasil eksperimen dan simulasi (a) perbandingan hasil pada variasi kecepatan dengan duty ratio (b) perbandingan dari hubungan kecepatan sudut dengan penggerak voltage^[4].

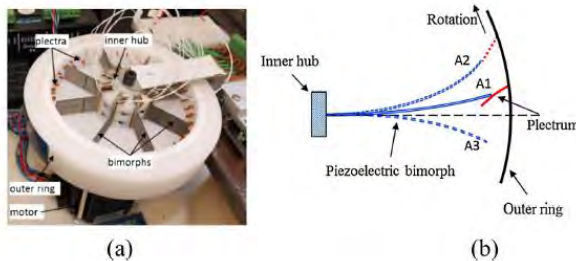
Pada grafik (a) diatas terlihat pada duty ratio 50%, pergerakan dari kecepatan dan perpindahan jarak body sulit untuk dikontrol, hasil eksperimen pada duty ratio 10% dan 90% mempunyai effect yang kecil pada kecepatan *piezoelectric* dan perpindahan massa utama. Data duty ratio diatas tidak sesuai untuk dibandingkan. Pada duty ratio 20%-40% dan 60%-80% terjadi hasil yang bersebrangan. Untuk nilai 40% dan 60% type A terlihat lebih cepat pada kecepatan perpindahan massa utama dibandingkan tipe B dengan variasi *frekuensi* tipe A 3036 Hz dan tipe B 6900 Hz.

Paada grafik (b) pada pengukuran percepatan sudut dari tipe A terlihat lebih cepat dari tipe B. hal ini diakibatkan oleh ketidak seimbangan pada berat kedua massa *piezoelectric* dan menghasilkan ketidaksesuaian antara hasil eksperimen dan simulasi.

Hasil dari eksperimen didapatkan nilai untuk kecepatan 21 mm/s, kecepatan sudut 3,72 rad/s, dan 2,32 mN untuk gaya yang dapat dikeluarkan. Hal ini menunjukan

bahwa tipe A lebih baik dibandingkan tipe B dari pengujian kecepatan (perpindahan massa utama), kecepatan sudut dan gaya yang dihasilkan.

Penelitian *eksperimen piezoelectric energi harvester* (mech-PEH) dan validasi juga dilakukan oleh Yang Kuang, Meiling Zhu^[5]. Pada jurnal penelitiannya, dilakukan eksperimen prototype dari alat mekanik yang akan memetic *piezoelectric energi harvester* yang divalidasi menggunakan *finite element modeling*. Dengan rancangan sebagai berikut:



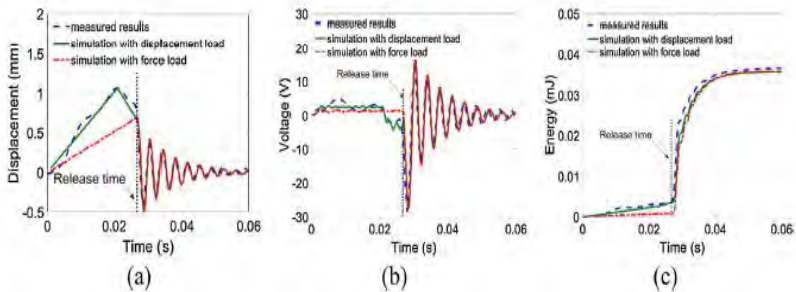
Gambar 2.23 (a) *prototype* alat mekanisme pemetik dari *piezoelectric energi harvester* (b) ilustrasi cara kerja dari *prototype*^[5]

Cara kerja alat *prototype* diatas yaitu ketika motor berputar maka *outer ring* akan berputar sama dengan putaran motor, pada saat *outer ring* berputar *piezoelectric bimorph* akan ikut berputar juga, *piezoelectric bimorph* akan mengenai *plectrum*. Dari putaran yang rendah dari *outer ring*, akan dikonversi dari resonansi *piezoelectric bimorph* akan mencapai frekuensi yang tinggi dan output energi listrik yang besar.

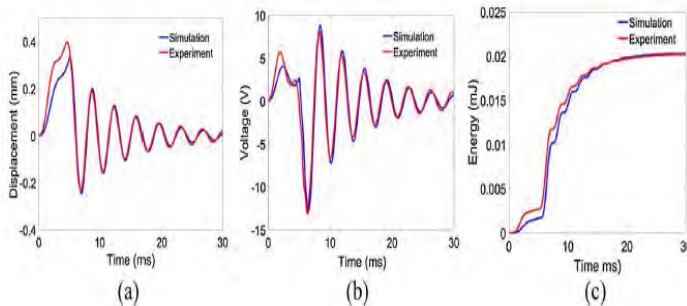
Analisis transient digunakan pada penelitian ini dengan parameter ALPHA = 0.25, DELTA=0.5, THETA =

0.5, waktu step 0.0001 s, maksimum resonansi frekuensi 937 Hz dan variasi yang diberikan 0,5 s ~ 100 s .

Dari data eksperimen dan simulasi didapatkan hubungan waktu dengan jarak, waktu dengan voltage, dan waktu dan energi yang dihasilkan seperti pada gambar 2.24 dibawah;



Gambar 2.24 (A) perbandingan antara hasil dari simulasi dan eksperimen pada kecepatan 2.5 s per revolution (a) perpindahan (b) voltage (c) energi yang dihasilkan^[5]

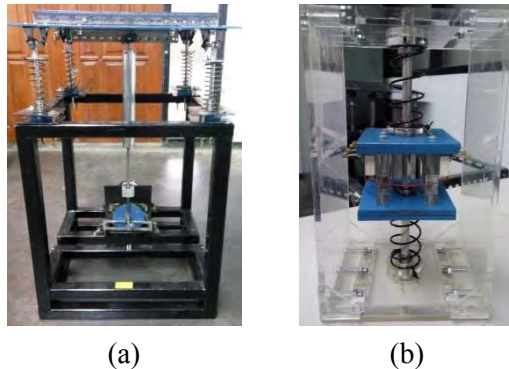


Gambar 2.25 (B) perbandingan antara hasil dari simulasi dan eksperimen pada kecepatan 1 s per revolution (a) perpindahan (b) voltage (c) energi yang dihasilkan^[5]

Pada gambar 2.25 (A) dan 2.25 (B) terlihat bahwa hasil dari eksperimen dan simulasi didapatkan hasil yang akurat pada semua pengujian. Pada gambar 2.25 (A) energi yang dihasilkan pada 0,06 s didapatkan 0.0036 mJ dan dibandingkan dengan hasil eksperimen sebesar 0.0037 mJ. Error dari hasil eksperimen dan simulasi didapatkan 2,7 %. Untuk hasil eksperimen pada jarak perpindahan maksimal didapatkan hasil 0,65 mm lebih rendah dibandingkan dengan hasil simulasi yang didapatkan hasil 1,02 mm hal ini karena diakibatkan oleh diabaikannya *fase sliding* pada simulasi.

2.3. Permodelan Sistem Dinamis

Berdasarkan mekanisme dari sistem utama dan CPVA dari penelitian sebelumnya setelah perbaikan rangka sebagai berikut:

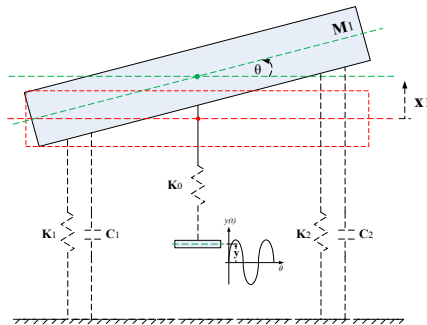


Gambar 2.26 (a) Alat simulator getaran & (b) *cantilever piezoelectric vibration absorber (CPVA)*

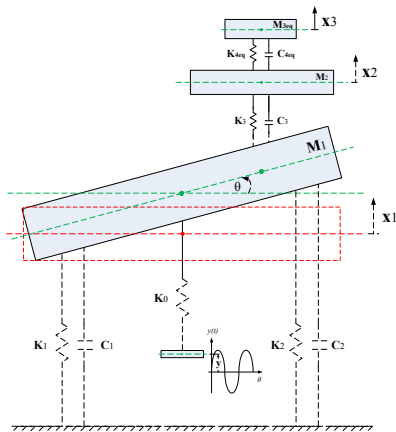


Gambar 2.27 alat simulator getaran dengan penambahan *cantilever piezoelectric vibration absorber* (CPVA)

Dapat dilakukan pemodelan dinamis, permodelan yang dilakukan berupa model dinamis *sistem* massa utama tanpa penambahan CPVA seperti pada gambar 2.28 dan sistem utama dengan penambahan CPVA pada gambar 2.29 sebagai berikut:



Gambar 2.28 permodelan sistem dinamis tanpa penambahan CPVA^[2]



Gambar 2.29 permodelan sistem dinamis dengan penambahan CPVA^[2]

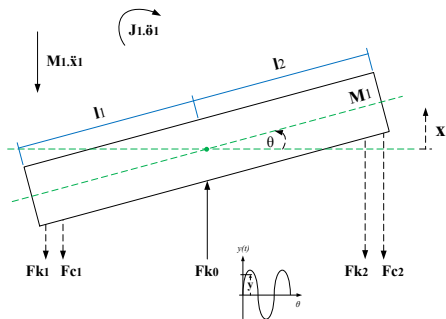
Keterangan:

- M_1 = Massa sistem utama
- M_2 = Massa *Absorber*
- M_3 = Massa piezoelectric
- x_1 = perpindahan massa sistem utama
- x_2 = perpindahan massa absorber
- x_3 = perpindahan massa piezoelectric
- y = amplitude massa eksentrik motor
- θ = perpindahan angular sistem utama
- k_1 = koefisien pegas 1 di sistem utama
- k_2 = koefisien pegas 2 di sistem utama
- k_3 = koefisien pegas 3 di absorber
- k_4 = koefisien pegas 4 di piezoelectric
- c_1 & c_2 = koefisien redaman 1 dan 2 di sistem utama
- c_3 = koefisien redaman 3 di absorber
- c_4 = koefisien redaman 4 di piezoelectric

2.3.1 Penurunan Persamaan Gerak

2.3.1.1 Analisa Permodelan Sistem Utama tanpa Penambahan CPVA

Dari permodelan sistem utama tanpa CPVA yang ditujukan oleh gambar 2.28, dibuat *free-body-diagram* yang selanjutnya akan dianalisa gerak dari massa utama dengan menggunakan metode kesetimbangan gaya, persamaan matematis dari massa utama tersebut dengan arah gerak translasi dan rotasi.



Gambar 2.30 *Free-Body-Diagram* dari massa sistem utama tanpa penambahan CPVA^[2]

Keterangan:

F_{k0} = Gaya eksitasi harmonik
massa eksentrik motor (N)

F_{k1} = Gaya reaksi pegas 1 (N)

F_{k2} = Gaya reaksi pegas 2 (N)

F_{c1} = Gaya reaksi peredam 1 (N)

F_{c2} = Gaya reaksi peredam 2 (N)

x_1 = Perpindahan massa
sistem utama (m)

y = Amplitudo dari massa
eksentrik motor (m)

θ = Perpindahan angular
sistem utama (rad)

➤ Gerak tranlasi massa utama

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 -Fk_1 - Fc_1 - Fk_2 - Fc_2 + Fk_0 &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 -k_1(x_1 - \theta \cdot l_1) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \cdot l_1) - k_2(x_1 + \theta \cdot l_2) - \\
 c_2(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \cdot l_2) + k_0(y - x_1) &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 -k_1x_1 + k_1l_1\theta - c_1\dot{x}_1 + c_1l_1\dot{\theta} - k_2x_1 - k_2l_2\theta - c_2\dot{x}_1 - \\
 c_2l_2\dot{\theta} + k_0y - k_0x_1 &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 m_1 \ddot{x}_1 + k_1x_1 - k_1l_1\theta + c_1\dot{x}_1 - c_1l_1\dot{\theta} + k_2x_1 + k_2l_2\theta + c_2\dot{x}_1 + \\
 c_2l_2\dot{\theta} - k_0y + k_0x_1 &= 0 \\
 m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2)\dot{x}_1 + (k_0 + k_1 + k_2)x_1 + (c_2l_2 - \\
 c_1l_1)\dot{\theta} + (k_2l_2 - k_1l_1)\theta &= k_0y
 \end{aligned}$$

➤ Gerak rotasi massa utama

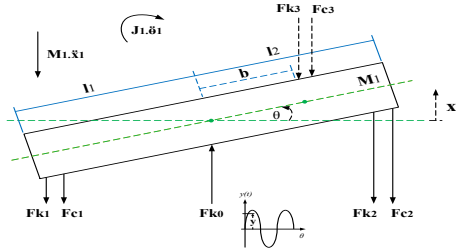
$$\begin{aligned}
 \Sigma M &= J_1 \ddot{\theta} \\
 Fk_1 \cdot l_1 + Fc_1 \cdot l_1 - Fk_2 \cdot l_2 - Fc_2 \cdot l_2 &= J_1 \ddot{\theta} \\
 k_1(x_1 - \theta \cdot l_1) \cdot l_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \cdot l_1) \cdot l_1 - k_2(x_1 + \theta \cdot l_2) \cdot l_2 - \\
 c_2(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \cdot l_2) \cdot l_2 &= J_1 \ddot{\theta} \\
 k_1l_1x_1 - k_1l_1^2\theta + c_1l_1\dot{x}_1 - c_1l_1^2\dot{\theta} - k_2l_2x_1 - k_2l_2^2\theta - \\
 c_2l_2\dot{x}_1 - c_2l_2^2\dot{\theta} &= J_1 \ddot{\theta} \\
 J_1 \ddot{\theta} - k_1l_1x_1 + k_1l_1^2\theta - c_1l_1\dot{x}_1 + c_1l_1^2\dot{\theta} + k_2l_2x_1 + \\
 k_2l_2^2\theta + c_2l_2\dot{x}_1 + c_2l_2^2\dot{\theta} &= 0 \\
 J_1 \ddot{\theta} + (c_2l_2 - c_1l_1)\dot{x}_1 + (k_2l_2 - k_1l_1)x_1 + (c_1l_1^2 + \\
 c_2l_2^2)\dot{\theta} + (k_1l_1^2 + k_2l_2^2)\theta &= 0
 \end{aligned}$$

2.3.1.2 Analisa Permodelan Sistem Utama dengan Penambahan CPVA

Dari permodelan sistem utama dengan penambahan CPVA yang ditujukan oleh gambar 2.29, dibuat *free-body-diagram* yang selanjutnya akan dianalisa gerak dari massa utama

dengan menggunakan metode kesetimbangan gaya, persamaan matematis dari massa utama tersebut dengan arah gerak translasi dan rotasi.

1. Massa Sistem Utama



Gambar 2.31 *free-body-diagram* dari *sistem* utama dengan penambahan *CPVA*^[2]

➤ Gerak tranlasi massa utama

$$\Sigma F = m_1 \ddot{x}_1$$

$$-Fk_1 - Fc_1 - Fk_2 - Fc_2 - Fk_3 - Fc_3 + Fk_0 = m_1 \ddot{x}_1$$

$$-k_1(x_1 - \theta \cdot l_1) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \cdot l_1) - k_2(x_1 + \theta \cdot l_2) -$$

$$c_2(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \cdot l_2) - k_3(x_1 + \theta \cdot b) + k_3 x_2 -$$

$$c_3(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \cdot b) + c_3 \dot{x}_2 + k_0(y - x_1) = m_1 \ddot{x}_1$$

$$-k_1 x_1 + k_1 l_1 \theta - c_1 \dot{x}_1 + c_1 l_1 \dot{\theta} - k_2 x_1 - k_2 l_2 \theta - c_2 \dot{x}_1 -$$

$$c_2 l_2 \dot{\theta} - k_3 x_1 - k_3 b \theta + k_3 x_2 - c_3 \dot{x}_1 - c_3 b \dot{\theta} +$$

$$c_3 \dot{x}_2 + k_0 y - k_0 x_1 = m_1 \ddot{x}_1$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_1 l_1 \theta + c_1 \dot{x}_1 - c_1 l_1 \dot{\theta} + k_2 x_1 + k_2 l_2 \theta +$$

$$c_2 \dot{x}_1 + c_2 l_2 \dot{\theta} + k_3 x_1 + k_3 b \theta - k_3 x_2 + c_3 \dot{x}_1 +$$

$$c_3 b \dot{\theta} - c_3 \dot{x}_2 - k_0 y + k_0 x_1 = 0$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2 + c_3) \dot{x}_1 - c_3 \dot{x}_2 + (k_0 + k_1 + k_2 +$$

$$k_3) x_1 - k_3 x_2 + (c_2 l_2 + c_3 b - c_1 l_1) \dot{\theta} +$$

$$(k_2 l_2 + k_3 b - k_1 l_1) \theta = k_0 y$$

$$(2.41)$$

➤ Gerak rotasi massa utama

$$\Sigma M = J_1 \ddot{\theta}$$

$$Fk_1 \cdot l_1 + Fc_1 \cdot l_1 - Fk_2 \cdot l_2 - Fc_2 \cdot l_2 - Fk_3 \cdot b - Fc_3 \cdot b = J_1 \ddot{\theta}$$

$$k_1(x_1 - \theta \cdot l_1) \cdot l_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \cdot l_1) \cdot l_1 - k_2(x_1 + \theta \cdot l_2) \cdot l_2 -$$

$$c_2(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \cdot l_2) \cdot l_2 - k_3(x_1 + \theta \cdot b) \cdot b + k_3x_2 \cdot b -$$

$$c_3(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \cdot b) \cdot b + c_3\dot{x}_2 \cdot b = J_1 \ddot{\theta}$$

$$k_1l_1x_1 - k_1l_1^2\theta + c_1l_1\dot{x}_1 - c_1l_1^2\dot{\theta} - k_2l_2x_1 - k_2l_2^2\theta -$$

$$c_2l_2\dot{x}_1 - c_2l_2^2\dot{\theta} - k_3bx_1 - k_3b^2\theta + k_3bx_2 -$$

$$c_3b\dot{x}_1 - c_3b^2\dot{\theta} + c_3b\dot{x}_2 = J_1 \ddot{\theta}$$

$$J_1 \ddot{\theta} - k_1l_1x_1 + k_1l_1^2\theta - c_1l_1\dot{x}_1 + c_1l_1^2\dot{\theta} + k_2l_2x_1 +$$

$$k_2l_2^2\theta + c_2l_2\dot{x}_1 + c_2l_2^2\dot{\theta} + k_3bx_1 + k_3b^2\theta -$$

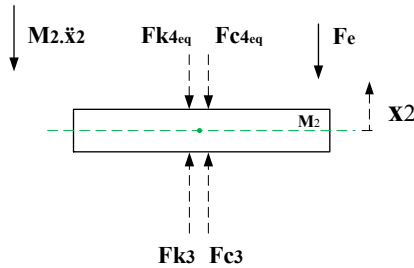
$$k_3bx_2 + c_3b\dot{x}_1 + c_3b^2\dot{\theta} - c_3b\dot{x}_2 = 0$$

$$J_1 \ddot{\theta} + (c_2l_2 + c_3b - c_1l_1)\dot{x}_1 - c_3b\dot{x}_2 + (k_2l_2 + k_3b -$$

$$k_1l_1)x_1 - k_3bx_2 + (c_1l_1^2 + c_2l_2^2 + c_3b^2)\dot{\theta} +$$

$$(k_1l_1^2 + k_2l_2^2 + k_3b^2)\theta = 0$$

2. Analisa Massa Absorber



Gambar 2.32 *free-body-diagram* dari absorber pada mekanisme CPVA^[2]

Keterangan:

Fk_3 = Gaya reaksi pegas 3 (N)

Fc_3 = Gaya reaksi peredam 3 (N)

Fk_{4eq} = Gaya reaksi pegas pada piezoelektrik (N)

Fc_{4eq} = Gaya reaksi peredam pada piezoelektrik (N)

F_e = Gaya *coupling* piezoelektrik (N)

x_2 = Perpindahan massa *absorber* (m)

➤ Gerak tranlasi massa *absorber*

$$\Sigma F = m_2 \ddot{x}_2$$

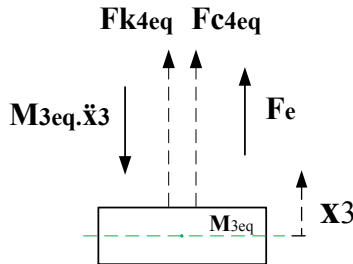
$$Fk_3 + Fc_3 - Fk_{4eq} - Fc_{4eq} - F_e = m_2 \ddot{x}_2$$

$$k_3(x_1 + \theta \cdot b) - k_3x_2 + c_3(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \cdot b) - c_3\dot{x}_2 - k_{4eq}(x_2 - x_3) - c_{4eq}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - \Gamma n V_p = m_2 \ddot{x}_2$$

$$k_3x_1 + k_3b\theta - k_3x_2 + c_3\dot{x}_1 + c_3b\dot{\theta} - c_3\dot{x}_2 - k_{4eq}x_2 + k_{4eq}x_3 - c_{4eq}\dot{x}_2 + c_{4eq}\dot{x}_3 - \Gamma n V_p = m_2 \ddot{x}_2$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_3\dot{x}_1 + (c_3 + c_{4eq})\dot{x}_2 - c_{4eq}\dot{x}_3 - c_3b\dot{\theta} - k_3x_1 + (k_3 + k_{4eq})x_2 - k_{4eq}x_3 - k_3b\theta = -\Gamma n V_p$$

3. Analisa Massa *Cantilever Piezoelectric*



Gambar 2.33 *Free-body-diagram* dari *piezoelectric cantilever* pada mekanisme CPVA^[2]

Keterangan:

Fk_{4eq} = Gaya reaksi pegas pada piezoelektrik (N)

Fc_{4eq} = Gaya reaksi peredam pada piezoelektrik (N)

Fe = Gaya *coupling* piezoelektrik (N)

m_{3eq} = Pernindahan massa piezoelektrik (m)

➤ Gerak tranlasi massa *piezoelectric cantilever*

$$\Sigma F = m_{3eq} \ddot{x}_3$$

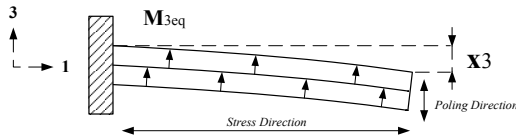
$$Fk_{4eq} + Fc_{4eq} + Fe = m_{3eq} \ddot{x}_3$$

$$k_{4eq}(x_2 - x_3) + c_{4eq}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + \Gamma n V_p = m_{3eq} \ddot{x}_3$$

$$k_{4eq}x_2 - k_{4eq}x_3 + c_{4eq}\dot{x}_2 - c_{4eq}\dot{x}_3 + \Gamma n V_p = m_{3eq} \ddot{x}_3$$

$$m_{3eq} \ddot{x}_3 - c_{4eq}\dot{x}_2 + c_{4eq}\dot{x}_3 - k_{4eq}x_2 + k_{4eq}x_3 = \Gamma n V_p$$

Pada pemodelan piezoelektrik *cantilever*, dilakukan analisa pemodelan dinamis piezoelektrik secara mekanik dan analisa pemodelan kelistrikan piezoelektrik jenis batang *cantilever*. Skema dari piezoelektrik jenis batang *cantilever* dengan arah polarisasi dan arah Energi yang terjadi dapat dilihat pada gambar 2.32. Energi yang terjadi sepanjang sumbu 1 disebabkan oleh defleksi material piezoelektrik sebesar x_3 . Nilai Energi tersebut akan mempengaruhi jumlah energi densitas atau voltase bangkitan yang dapat dihasilkan oleh piezoelektrik.



Gambar 2.34 skema *piezoelectric* yang dipengaruhi energi mekanik dan arah polarisasi^[2]

Voltase bangkitan yang dihasilkan oleh piezoelektrik tersebut disebabkan oleh adanya gaya eksternal atau terjadinya defleksi pada material piezoelektrik. Untuk memperoleh nilai dari voltase bangkitan dari material piezoelektrik dapat digunakan persamaan:

$$V_0 = \frac{d_{31} \cdot Y \cdot w \cdot x_3}{C}$$

dimana,

d_{31} = Piezoelectric charge constant (C/N)

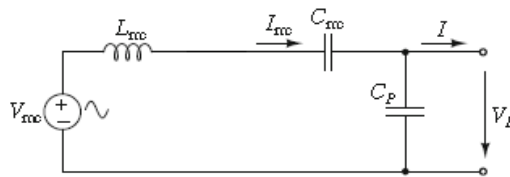
Y = Modulus Young (N/m^2)

w = Lebar piezoelektrik (m)

x_3 = Defleksi piezoelektrik (m)

C = Kapasitansi (f)

Rangkaian kelistrikan dari suatu material piezoelektrik dapat dilihat pada gambar 2.33. pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa selain voltase bangkitan, energi listrik yang dihasilkan oleh material piezoelektrik adalah arus listrik dan daya bangkitan. Arus bangkitan dari energi listrik pada mekanisme piezoelektrik tersebut dapat dirumuskan menjadi:



Gambar 2.35 diagram rangkaian *electromagnetic piezoelectric* jenis batang *cantilever*^[2]

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p$$

$$I_{mc} = \frac{1}{L_{mc}} (V_{mc} - R_{mc} I_{mc} - \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt - V_p)$$

Nilai dari V_{mc} , L_{mc} , R_{mc} , dan C_{mc} dapat diperoleh dari:

$$V_{mc} = \frac{F_i}{\Gamma} ; L_{mc} = \frac{m}{\Gamma^2} ; R_{mc} = \frac{d_p}{\Gamma^2} ; C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p} ; \Gamma = k_{31} \sqrt{k_p C_p}$$

dimana, $F_i = m \cdot \ddot{y} = m \cdot a$ Gaya lendutan dari eksitasi (N)

m = Massa (kg)

d_p = Konstanta redaman ekuivalen piezoelektrik (N.s/m)

k_p = Konstanta kekakuan ekuivalen piezoelektrik (N/m)

C_p = Kapasitansi piezoelektrik (F)

k_{31} = Electromechanical coupling factor

V_p = Voltase bangkitan (V)

V_{mc} = Sumber Energi pada pemodelan *piezoelectric harvester* (V)

L_{mc} = Induktansi pada pemodelan *piezoelectric harvester* (H)

R_{mc} = Resistansi pada pemodelan *piezoelectric harvester* (Ω)

C_{mc} = Kapasitansi pada pemodelan *piezoelectric harvester* (F)

I_{mc} = Arus listrik pada pemodelan *piezoelectric harvester* (A)

Γ = Generalized electromechanical coupling factor (A.s/m)

Sehingga daya bangkitan dari energi listrik pada piezoelektrik dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$P = V_p I_{mc}$$

dimana, P = Daya bangkitan piezoelektrik (*Watt*)

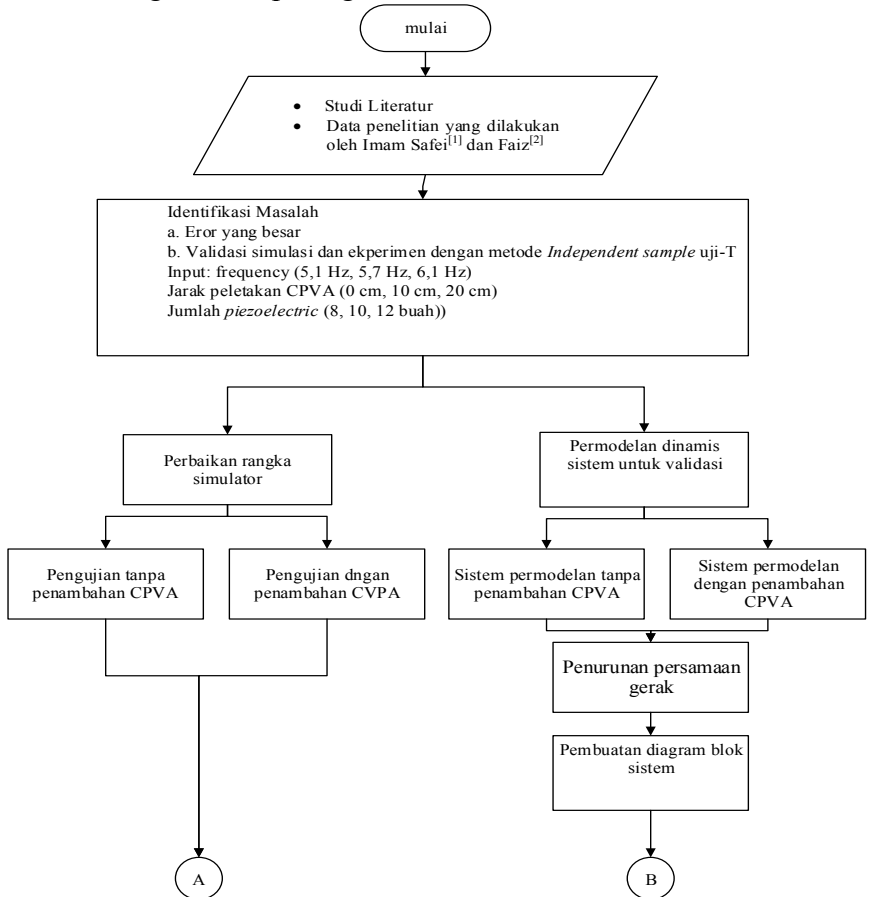
I_{mc} = Arus bangkitan (*Ampere*)

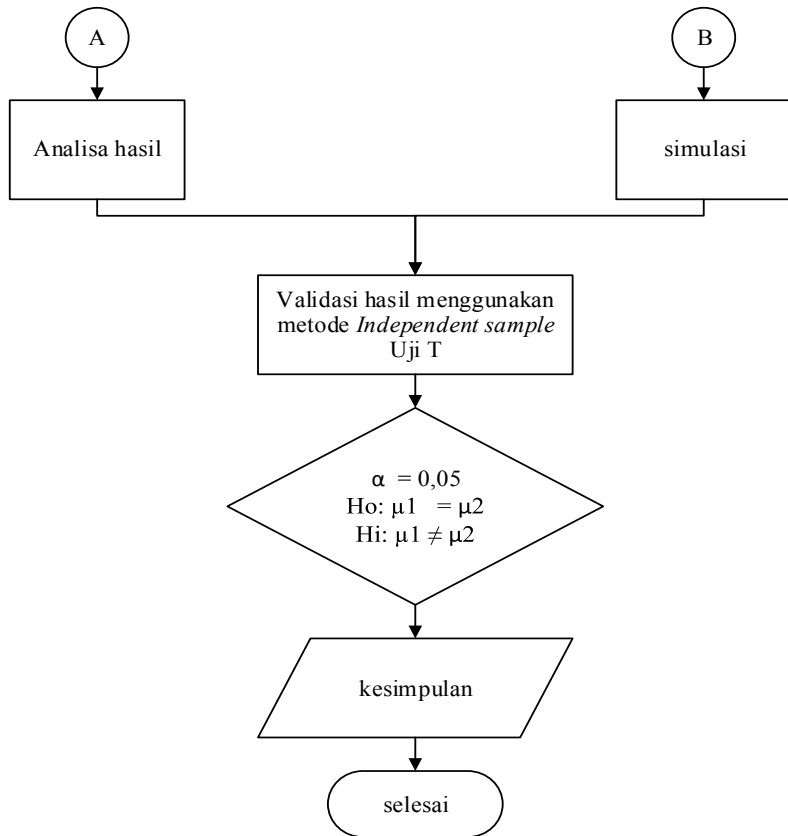
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ditujukan melalui diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2. Metode Pengerjaan Penelitian

Metode pelaksanaan penelitian tugas akhir ini secara umum dijelaskan oleh gambar 3.1 yang terdiri dari beberapa tahap pengerjaan. Untuk dapat memperoleh hasil yang diinginkan, maka perlu dilakukan pemahaman terhadap metode-metode yang dilakukan tersebut.

3.2.1. Studi Literatur

Dalam penelitian ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam analisa permodelan *Dynamic Vibration Absorber (DVA)* yang dijadikan permasalahan. Studi literatur merupakan langkah awal untuk menambah wawasan pengetahuan, dan landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas. Studi literatur didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian terdahulu yang berkaitan.

3.2.2. Identifikasi Masalah

Pada Tugas Akhir ini masalah diidentifikasi dari hasil penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Imam Safei^[1] dan Faiz Imawan Danaputra^[2] yang masih terdapat kekurangan, yaitu untuk hasil simulasi dan eksperimen terdapat perbedaan nilai yang cukup besar dari respon percepatan arah translasi dan rotasi dengan penambahan CPVA. Dari hasil penelitian terdahulu tersebut maka dilakukan perbaikan pada rangka simulator getaran dengan penambahan CPVA yang akan divalidasi antara hasil simulasi dan eksperimen menggunakan metode validasi *Independent sample* uji-T.

3.2.3. Penurunan Persamaan Gerak

Penurunan persamaan gerak dari sistem tanpa penambahan CPVA dan ketika dengan penambahan CPVA telah dijelaskan pada sub.bab 2.3.

3.2.4. Penentuan Parameter

Dalam tahap simulasi, dibutuhkan beberapa data pendukung agar diketahui hasil yang valid dalam proses simulasi. Data tersebut berupa parameter-parameter. Beberapa parameter yang digunakan meliputi massa, konstanta kekakuan pegas, konstanta redaman, dimensi dari piezoelektrik, serta frekuensi operasi alat yang akan digunakan. Metode yang digunakan dalam menentukan parameter-parameter tersebut, antara lain sebagai berikut:

3.2.4.1. Menentukan Massa Sistem Utama (M_1)

Sistem utama pada alat simulasi getaran berperan sebagai pemberi getaran sekaligus tempat terjadinya getaran. Massa sistem utama yang akan dianalisa terdiri dari beberapa komponen utama yaitu plat datar, batang penyangga plat datar, dan *box* dari mekanisme *CPVA* yang tersambung dengan plat datar. Oleh karena itu, massa total dari sistem utama yang akan dianalisa dapat diketahui dari persamaan:

$$M_1 = M_{plat\ datar} + M_{batang\ penyangga\ plat} + M_{box\ CPVA}$$

Setelah dilakukan perancangan mekanisme sistem utama dan pengukuran dimensi maupun massa komponen pendukung dari sistem utama tersebut, dapat diperoleh massa total sistem utama (M_1) sebesar 6.7 Kg.

3.2.4.2. Menentukan Massa Sistem *CPVA* (M_2)

Sistem *CPVA* yang berperan dalam meredam getaran yang terjadi pada sistem utama, terdiri dari beberapa komponen pendukung antara lain plat baja sebagai massa utama dari mekanisme *absorber*, tempat dudukan *cantilever piezoelectric*, *roller bearing*, dan baut. Sehingga massa total dari sistem *CPVA* tersebut dapat ditentukan dengan persamaan:

$$M_2 = M_{plat\ absorber} + M_{dudukan\ piezoelektrik} + M_{roller\ bearing} + M_{baut}$$

Berdasarkan teori yang bersumber dari buku “*Mechanical Vibrations*” oleh Rao^[6], diketahui bahwa rasio perbandingan yang optimum dari massa *DVA* dengan massa utama diperoleh dari persamaan:

$$\mu = \frac{M_2}{M_1} = \frac{1}{20}$$

3.2.4.3. Menentukan Konstanta Kekakuan Pegas Sistem Utama dan CPVA

Pada penelitian ini, terdapat empat buah pegas yang digunakan. Nilai dari empat buah pegas tersebut disesuaikan dengan kebutuhan dan ketersediaan dipasaran. Karena dipasaran tidak tertera secara langsung nilai dari kekakuan pegas maka untuk mengetahui nilai konstanta kekakuan (k) dari masing-masing pegas, maka dilakukan pengujian terlebih dahulu dengan langkah pertama yaitu memberikan massa tertentu pada pegas yang akan digunakan hingga terjadi perubahan panjang (Δx). Langkah berikutnya adalah mengukur dan mencatat perubahan panjang yang terjadi pada pegas dengan menggunakan alat jangka sorong. Berdasarkan Hukum Hooke yang menyatakan bahwa gaya pegas (F_k) besarnya sebanding dengan deformasi atau perubahan panjang pegas yang terjadi, maka dari data pengujian yang diperoleh dapat ditentukan nilai konstanta kekakuan pegas dengan persamaan:

$$F_k = k \cdot \Delta x$$

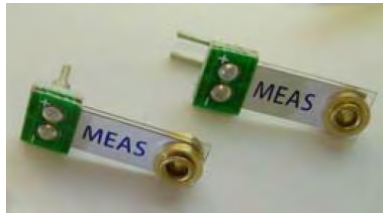
3.2.4.4. Menentukan Konstanta Kekakuan Pegas dari *Cantilever Piezoelectric*

Pada mekanisme CPVA, terdapat piezoelektrik dengan jenis *cantilever beam* yang memiliki besar nilai *Modulus Young* (E) dan dimensi yang dapat diketahui dari spesifikasi material piezoelektrik yang tersedia. Dengan demikian, untuk mengetahui konstanta kekakuan piezoelektrik dapat digunakan persamaan:

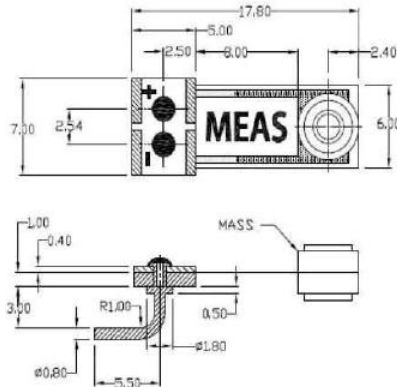
$$k_p = k_4 = \frac{3EI}{l^3}$$

$$I = \frac{1}{12} b h^3$$

Berdasarkan persamaan 3.5 dan 3.6 di atas, diketahui bahwa untuk mengetahui konstanta kekakuan pegas dari piezoelektrik yang digunakan, maka perlu mengetahui dimensi dari piezoelektrik tersebut. Piezoelektrik yang digunakan merupakan piezoelektrik Minisense 100 *Vibration Sensor* dengan massa di bagian ujung piezoelektrik dan dapat dilihat pada gambar 3.2. Jenis piezoelektrik yang digunakan merupakan piezoelektrik vertikal atau piezoelektrik yang digunakan untuk pemasangan pada bidang vertikal. Spesifikasi dimensi dari material piezoelektrik yang digunakan tersebut dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.2 Piezoelektrik Minisense 100 *Vibration Sensor*^[2]



Gambar 3.3 Dimensi material piezoelektrik yang digunakan^[2]

3.2.4.5. Menentukan Frekuensi Operasi pada Sistem Utama

Parameter frekuensi operasi pada sistem utama harus diketahui terlebih dahulu, dari getaran yang terjadi tentunya mempunyai nilai frekuensi operasi dari sistem utama. Nilai frekuensi operasi sistem utama dapat ditentukan dengan mengetahui nilai frekuensi natural alat uji terlebih dahulu dengan persamaan:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_{eq}}{M_1}}$$

Pada penelitian yang dilakukan oleh Rahma, diketahui beberapa teori mengenai nilai optimum dari rasio frekuensi yang telah dilakukan oleh Galal A. Hassaan^[1] dan Pachpute^[1]. Menurut Pachpute^[1], nilai optimum dari rasio frekuensi natural sistem utama dengan frekuensi natural *absorber* berada pada *range* 0,7 hingga 0,8.

3.2.4.6. Parameter Penelitian

Pada penelitian ini telah ditentukan beberapa parameter dari sistem utama, sistem *CPVA*, dan material piezoelektrik yang akan digunakan dalam tahap simulasi

untuk mengetahui respon reduksi getaran massa utama dan energi listrik bangkitan yang dapat dihasilkan. Nilai parameter yang telah ditentukan ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Penelitian^[2]

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Massa Sistem Utama	M_1	6,7	Kg
2	Massa Absorber	M_2	0.3	Kg
3	Massa Piezoelektrik	M_3	6×10^{-4}	Kg
4	Panjang Piezoelektrik	L_{pzt}	12×10^{-3}	m
5	Lebar Piezoelektrik	w_{pzt}	6×10^{-3}	m
6	Tebal Piezoelektrik	t_{pzt}	1×10^{-3}	m
7	Konstanta Kekakuan Piezoelektrik	k_p	5.75×10^{-1}	N/m
8	Kapasitansi Piezoelektrik	C_p	244×10^{-10}	F
9	<i>Electromechanical Coupling Factor</i>	k_{31}	12	%
10	<i>Piezoelectric Charge Constant</i>	d_{31}	110×10^{-12}	C/N
11	Modulus Young	E	3×10^9	N/m ²

3.2.5. Blok Diagram

Hasil *state variable* dari permodelan dinamis akan dirubah kedalam blok diagram dengan bantuan Simulink matlab. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan penyelesaian persamaan matematis dari permodelan sistem tanpa penambahan CPVA dan dengan penambahan CPVA pada sistem melalui metode *space state*. Saat eksekusi simulasi, input yang digunakan berupa input sinusoidal (*harmonic*) yang mempresentasikan getaran kearah translasi dan rotasi dari sistem.

3.2.6. Simulasi pada Matlab Simulink

Hal yang perlu diperhatikan untuk melakukan simulasi menggunakan Matlab Simulink adalah dengan mengetahui bentuk

input yang digunakan dan *output* yang akan dihasilkan oleh tahap simulasi tersebut. Setelah dilakukan tahap pemodelan dan pembuatan diagram blok sistem utama dengan penambahan *CPVA*, *input* yang digunakan untuk tahap simulasi adalah *sinusoidal* atau harmonik. Sedangkan *output* yang akan dihasilkan adalah perpindahan massa utama (X_1) yang kemudian akan digunakan sebagai *input* pada mekanisme massa *absorber*. *Output* yang dihasilkan adalah perpindahan massa *absorber* (X_2). Dengan konsep yang sama seperti mekanisme massa utama ke massa *absorber*, pada mekanisme piezoelektrik *input* yang digunakan adalah perpindahan massa *absorber* tersebut. Jika telah diketahui sebelumnya bahwa tujuan dari penggunaan piezoelektrik merupakan sebagai *energi harvesting* dari getaran yang terjadi, maka *output* yang dihasilkan dari mekanisme piezoelektrik antara lain adalah perpindahan piezoelektrik (X_3), arus, dan voltase bangkitan.

3.2.7. Eksperimen

Tahap eksperimen ini dilakukan untuk membuktikan hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya yang diwakilkan dengan alat uji. Alat uji yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan pada penelitian Imam Safei^[1] dengan perbaikan pada rangka simulator dengan mekanisme *CPVA*.

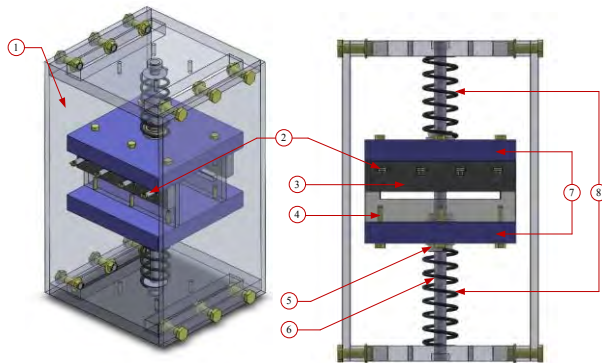
3.2.7.1. Peralatan Pengujian Utama

Peralatan pengujian utama terlihat pada gambar 3.4 berikut :



Gambar 3.4 Pemodelan sistem utama

Prinsip kerja dari alat simulator ini adalah motor akan memberikan gaya eksitasi pada massa utama yang akan mengakibatkan getaran pada arah translasi dan rotasi yang diakibatkan oleh perbedaan nilai konstanta pegas. Pada massa utama akan dipasang *DVA* dengan mekanisme *CPVA* yang berfungsi untuk mereduksi getaran massa sistem utama serta sebagai penghasil energi listrik. Berikut mekanisme *CPVA* terlihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Pemodelan CPVA^[1]

Prinsip kerja dari alat *cantilever piezoelectric vibration absorber* (CPVA) sama seperti prinsip kerja pada DVA yaitu menyerap sebagian energi yang berlebihan serta mengubah frekuensi operasional dari sistem massa utama alat simulator getaran, energi yang diserap melalui DVA dengan mekanisme CPVA dimanfaatkan kembali dan diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan piezoelektrik.

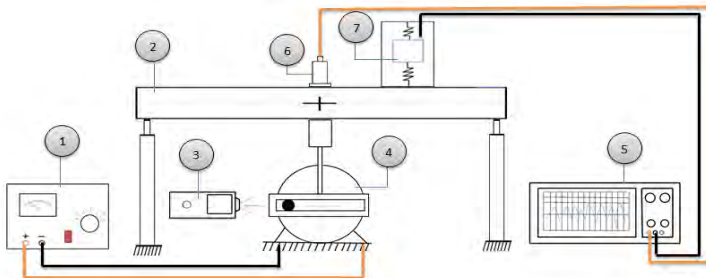
Alat CPVA seperti gambar diatas akan dipasang pada alat simulator getaran seperti pada gambar 2.27. dengan mekanisme kerja sebagai berikut:

1. Ketika motor dinyalakan dan membuat meja *exciter* bergetar kearah translasi dan rotasi.
2. Energi dari getaran meja *exciter* akan diredam oleh alat CPVA yang mengakibatkan energi getaran dari meja *exciter* disalurkan ke massa absorber dari alat CPVA. Energi getaran yang terjadi pada massa absorber di manfaatkan kembali oleh *piezoelectric* yang ikut terdefleksi akibat getaran pada massa absorber. Terdefleksinya material *piezoelectric* akan membangkitkan energi listrik.

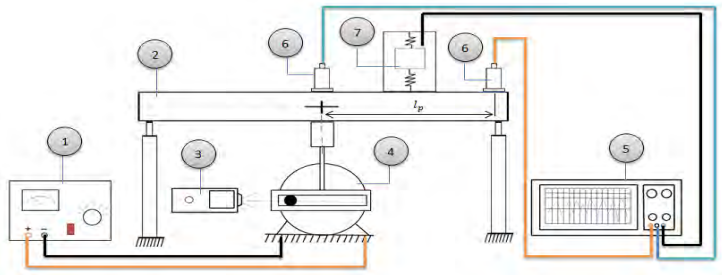
Dalam penelitian ini dipakai alat *cantilever piezoelectric vibration absorber* (CPVA) yang sama yang dipakai oleh penelitian yang dilakukan Imam Safei^[1] dan Faiz Imawan Danaputra^[2].

3.2.7.2. Skema Pengujian

Pada gambar 3.6 merupakan skema pengujian untuk gerak translasi, dimana posisi probe tepat berada di tengah sistem utama sedangkan untuk gambar 3.7 merupakan skema pengujian gerak rotasi dengan menggunakan dua buah probe dimana posisi probe pertama berada di titik tengah sistem utama dan yang lain berada di tepi dari sistem utama dengan jarak l_p . Namun untuk peralatan yang digunakan pada pengujian tetap sama.



Gambar 3.6 Skema pengujian gerak translasi^[1]

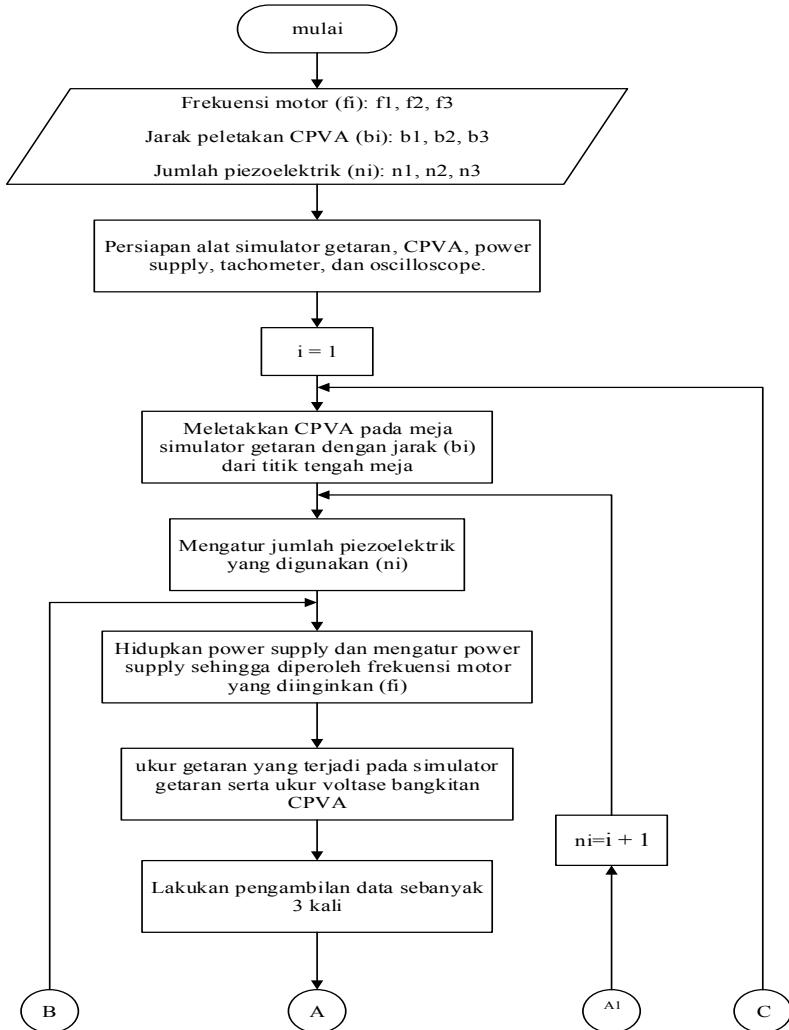


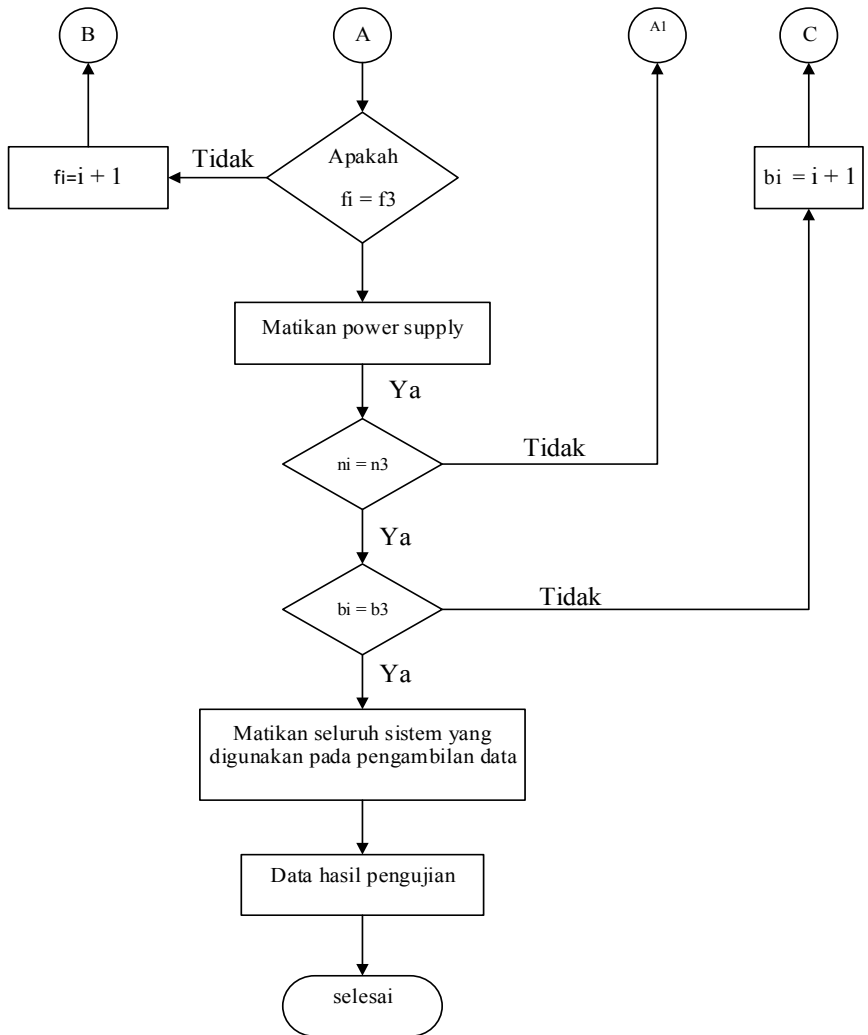
Gambar 3.7 Skema pengujian gerak rotasi^[1]

Keterangan:

1. *Power supply*
2. Sistem utama
3. Tachometer
4. Motor penggerak
5. Oscilloscope
6. Probe
7. CPVA

3.2.7.3. Flowchart Pengambilan Data Gerak Translasi dan Rotasi





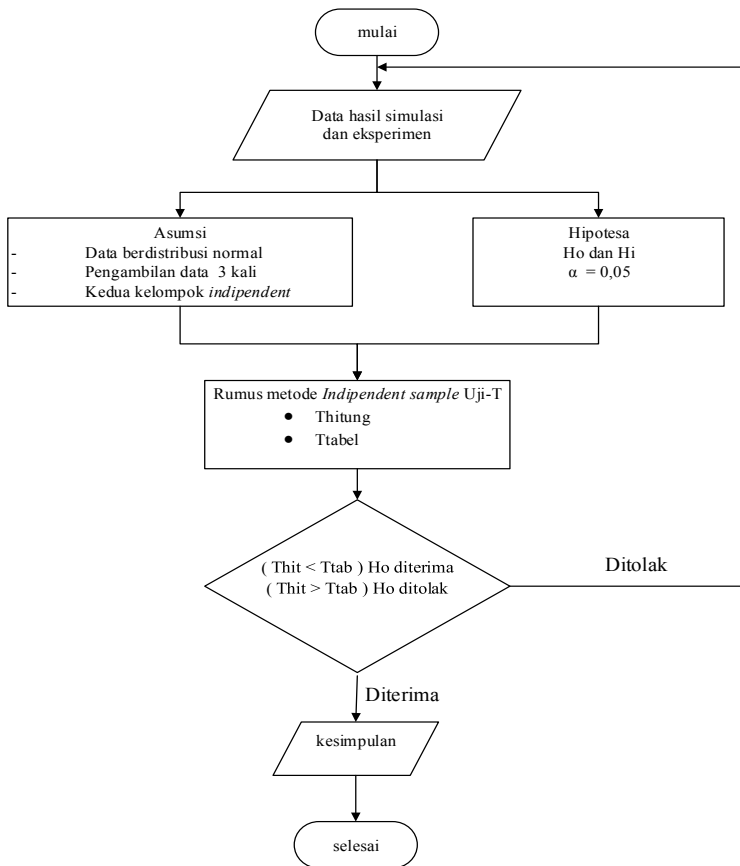
Gambar 3.8 *flowchart* proses pengambilan data eksperimen

3.2.8. Analisa Hasil

Pada tahap ini hasil data respon yang diperoleh pada simulasi sebelumnya dianalisa lebih mendalam.

3.2.9. Validasi Hasil

3.2.9.1. Flowchart Proses Validasi



Gambar 3.9 flowchart metode validasi *Independent sample uji-T*

Dari *flowchart* pada gambar 3.9 dijelaskan tahapan-tahapan dalam metode validasi *Independent sample* uji T. Lebih detail dapat dijelaskan bahwa Pengolahan data hasil dari simulasi dan eksperimen dengan menggunakan metode *Independent sample* uji-T dapat dilakukan dengan beberapa tahap sebagai berikut:

1. Dalam metode uji data harus memenuhi beberapa asumsi yang harus dipenuhi sebagai syarat bahwa metode *independent sample* uji-T ini sesuai dalam pengolahan data dari hasil eksperimen yang merupakan kondisi yang tidak ideal dengan simulasi dengan kondisi ideal
 - a. Pada penelitian ini agar sesuai dengan asumsi metode uji maka pengambilan data harus berdistribusi normal dengan pengambilan data ($n \leq 30$). Dari asumsi tersebut maka pada penelitian ini pengambilan tiap sample akan dilakukan 3 kali pengambilan data.
 - b. Kedua kelompok harus *independent* (bebas)
2. Setelah asumsi dalam metode *independent sample* uji-T telah terpenuhi maka di buat suatu hipotesa $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ artinya H_0 merupakan suatu hipotesa yang merupakan terdapat kesamaan data antara rata-rata data dari eksperimen dan simulasi.
3. Nilai untuk α pada penelitian ini yaitu 0,05. α diartikan sebagai suatu nilai kritis yang diijinkan dalam pengujian ini yaitu 0,05.
4. Hipotesa yang ke dua yaitu $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ yang artinya bahwa adanya perbedaan data antara data hasil eksperimen dan simulasi. Kedua hipotesa yang dibuat merupakan suatu aturan yang akan dipakai dalam menarik kesimpulan pada nilai akhir uji T hitung dengan uji T dari tabel. Bila nilai uji T hitung lebih besar dari nilai uji T tabel maka hipotesa dari $H_0 = \alpha$ ditolak.
5. Setelah dibuat 2 buah hipotesa maka selanjutnya hasil data yang didapat dari hasil simulasi dan eksperimen dihitung menggunakan rumus *indipendent sample* uji-t sebagai berikut:

$$t_{hit} = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\frac{SS_1 + SS_2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

M_1 = rata-rata hasil simulasi

M_2 = rata-rata hasil eksperimen

SS_1 = sum of square simulasi

SS_2 = sum of square eksperimen

n_1 = jumlah pengambilan sample simulasi

n_2 = jumlah pengambilan sample eksperimen

Dimana:

$$M_1 = \frac{\sum X_1}{n_1} \quad SS_1 = \left(\frac{(\sum X_1^2)}{n_1} - \bar{x}_1^2 \right)^{0,5}$$

$$M_2 = \frac{\sum X_2}{n_2} \quad SS_2 = \left(\frac{(\sum X_2^2)}{n_2} - \bar{x}_2^2 \right)^{0,5}$$

6. Setelah didapatkan nilai t_{hitung} selanjutnya cari nilai dari t_{tabel} dengan parameter α dan nilai $v_1 = (n_1 + n_2) - 2$ dari tabel distribusi T
7. Setelah didapatkan nilai dari t_{hit} dan t_{tab} maka dapat disimpulkan apabila nilai t_{hit} lebih besar dari t_{tab} ($t_{hit} > t_{tab}$) maka Hipotesa H_0 ditolak/tidak valid. Apabila ($t_{hit} < t_{tab}$) maka hipotesis H_0 diterima/ valid.

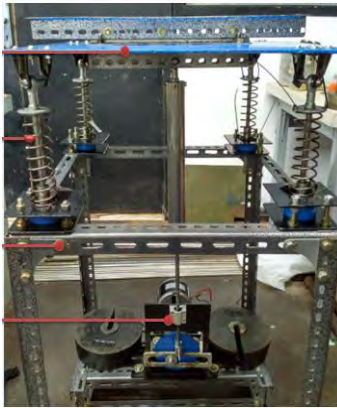
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perbaikan Rangka Alat Simulator Getaran

Alat simulator getaran yang digunakan pada penelitian terdahulu^[1] telah diuji antara hasil simulasi dan eksperimen mempunyai nilai RMS yang berbeda. Pengujian dilakukan pada arah percepatan translasi dan rotasi. Nilai yang didapat antara hasil eksperimen untuk percepatan arah translasi sebesar $0,2077 \text{ m/s}^2$ dan $0,4741 \text{ rad/s}^2$ untuk arah rotasi, sementara untuk hasil dari simulasi, nilai percepatan arah translasi sebesar 40 m/s^2 dan 37 rad/s^2 untuk arah rotasi. Perbedaan hasil percepatan arah translasi dan rotasi tersebut diidentifikasi masih terdapat kekurangan pada rangka alat simulator yang belum rigid. Hal ini dibuktikan ketika pengujian alat simulator. Gaya eksitasi yang diberikan motor yang seharusnya hanya menggetarkan meja alat simulator sebagai tempat pengujian, akan tetapi energi getaran juga ikut terserap oleh rangka alat simulator yang seharusnya rigid/ sebagai landasan. Pada sub bab ini dijelaskan tahapan perbaikan rangka simulator getaran agar lebih rigid dan energi getaran dari eksitasi motor tidak terserap terlalu besar oleh rangka alat simulator getaran.

Pada penelitian terdahulu^[1] alat simulator getaran menggunakan rangka dari bahan besi profil L setebal 1 mm, dengan dimensi 50 cm x 50 cm x 96 cm. Pada penelitian ini dilakukan perbaikan rangka dengan merubah bahan dan ketebalan dengan dimensi yang sama. Pada penelitian ini digunakan bahan besi hollow dengan ketebalan 3 mm dengan dimensi alat simulator sama seperti penelitian terdahulu^[1]. Pemilihan bahan dan ketebalan bahan didasari oleh ketersediaan bahan di pasaran. Berikut alat simulator getaran sebelum dan sesudah perbaikan:



(a)



(b)

Gambar 4.1 Alat simulator getaran (a)^[1] Sebelum, (b) Sesudah diperbaiki

4.2. Mekanisme Simulator Getaran dan CPVA

4.2.1. Mekanisme Alat Simulator Getaran

Alat simulator getaran mempunyai bagian-bagian utama sebagai berikut:



Gambar 4.2 Alat simulator getaran

Keterangan:

1. Meja sistem utama
2. Suspensi meja
3. Mekanisme penggerak
4. Rangka

Dari hasil timbangan untuk komponen-komponen yang menjadi massa utama dari sistem yaitu tampak pada tabel berikut:

Tabel 4.1 Massa utama

no	Nama komponen	Massa
1	Poros pengarah pada suspensi meja	0,6 kg
2	Meja sistem utama	5,9 kg
3	Poros penggerak	0,2 kg
4	Box CPVA	0,3 kg
Total massa		7 kg

Pada suspensi meja alat simulator getaran digunakan nilai kekakuan pegas yang berbeda antara suspensi sisi kiri dan kanan untuk menciptakan gerak translasi dan rotasi pada alat simulator getaran. Nilai kekakuan pegas dihitung dengan menggunakan hukum hooke:

$$F = k. \Delta X \text{ atau } W = k. \Delta$$

Adapun contoh perhitungan salah satu suspensi pegas sebagai berikut:

- Menghitung gaya (F) yang bekerja:

$$F = W$$

$$F = m. g$$

Misalkan beban yang diberikan sebesar 2 kg, maka

$$F = 2 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 19,62 \text{ N}$$

- Menghitung ΔX pegas:

$$\Delta X = X_1 - X_2$$

$$\Delta X = (0,085 - 0,0793) \text{ m} = 0,0057 \text{ m}$$

- Menghitung nilai kekakuan pegas:

$$k = \frac{F}{\Delta X}$$

$$k = 19,62 \text{ N} / 0,0057 \text{ m} = 3.442,105 \text{ m}$$

Pengujian suspensi pegas dilakukan sebanyak 3 kali dengan beban yang diberikan 2 kg dan didapat data hasil pengukuran sebagai berikut:

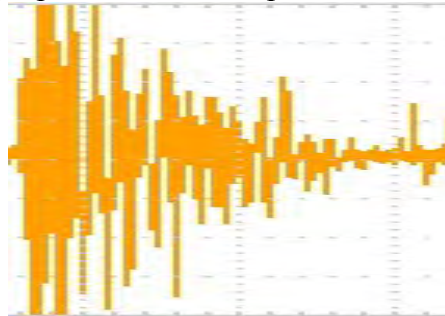
Tabel 4.2 Pengujian k_1

Panjang awal (m)	Beban (N)	Panjang akhir (m)	Selisih Panjang (m)	Nilai k (N/m)
0,085	19,6	0,076	0,009	2177,7
0,085	19,6	0,0762	0,0088	2227,3
0,085	19,6	0,0762	0,0088	2227,3
K rata-rata				2210,76

Tabel 4.3 Pengujian k_2

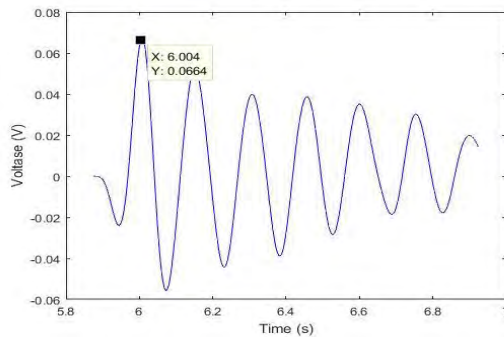
Panjang awal (m)	Beban (N)	Panjang akhir (m)	Selisih Panjang (m)	Nilai k (N/m)
0,085	19,6	0,0795	0,0054	3625,96
0,085	19,6	0,0796	0,0055	3563,63
0,085	19,6	0,0796	0,0054	3625,63
K rata-rata				3604,96

Kemudian untuk mengetahui konstanta redaman dari sistem utama dilakukan pengujian secara langsung pada sistem utama. Pengujian dilakukan dengan memberikan simpangan awal pada sistem utama dan membiarkannya untuk bergetar secara bebas. Respon getaran yang terjadi dari sistem utama diambil dengan menggunakan *accelerometer* dan ditampilkan pada oscilloscope untuk diolah dengan menggunakan persamaan *incremental degreement*. Gambar berikut merupakan gambar respon getaran yang diperoleh dari hasil pembacaan oscilloscope.



Gambar 4.3 Hasil pengukuran getaran bebas sistem utama dengan oscilloscope^[1]

Sebelum melakukan pengolahan data dengan menggunakan *incremental degreement* maka terlebih dahulu data hasil pengukuran dilakukan *filter* dan *smoothing* guna menghilangkan noise getaran yang terjadi. Gambar berikut ini memperlihatkan grafik hasil *smoothing* dan *filter* dari grafik pada gambar 4.3.



Gambar 4. 4 Grafik hasil pengukuran getaran bebas sistem utama dengan *smoothing* dan *filtering*^[1]

Pengolahan data dari grafik pada gambar 4.4 dilakukan dengan mencari nilai amplitudo rata-rata dari sebuah puncak dan sebuah lembah yang berdekatan (a_n) dan kemudian mencari rata-rata dari sebuah puncak dan sebuah lembah yang berurutan berikutnya (a_{n+1}). Dari rata-rata amplitudo pertama dan rata-rata amplitudo kedua tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan *incremental degreement* sebagaimana dalam persamaan berikut:

$$C = 2. (m). \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)} \right]^2 + 1}}$$

Berikut ini adalah contoh langkah-langkah yang dilakukan untuk mencari nilai konstanta redaman pada sistem utama.

- Menghitung rata-rata dari amplitudo pertama (a_n):

$$a_n = \frac{puncak_n - lembah_n}{2}$$

$$a_n = \frac{0,0664 - (-0,05522)}{2}$$

$$a_n = 0,06081 \text{ Volt}$$

- Menghitung rata-rata amplitudo kedua (a_{n+1}):

$$a_{n+1} = \frac{puncak_{n+1} - lembah_{n+1}}{2}$$

$$a_{n+1} = \frac{0,05225 - (-0,04437)}{2}$$

$$a_{n+1} = 0,04831 \text{ Volt}$$

- Menghitung nilai redaman sistem utama:

$$C = 2 \cdot (m_1) \cdot \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m_1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)} \right]^2 + 1}}$$

Untuk massa sistem utama yaitu 7 kg, konstanta pegas $k_1 = 4700 \text{ N/m}$ dan konstanta pegas $k_2 = 7200 \text{ N/m}$. Dengan memasukkan semua nilai parameter tersebut maka:

$$C = 2 \cdot (7) \cdot \sqrt{\frac{4700 + 7200}{7}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{0,06081}{0,04831}\right)} \right]^2 + 1}}$$

$$C = 21,12 \text{ N.s/m}$$

Cara yang sama sebagaimana contoh diatas diulang sebanyak 4 kali sehingga diperoleh data sebagaimana pada tabel

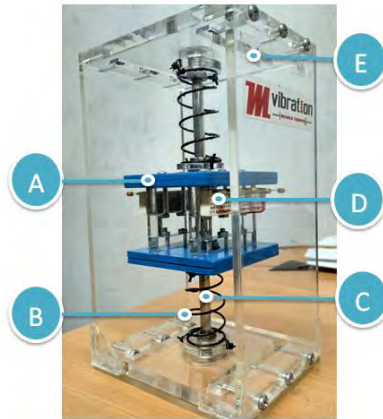
4.4. Dari tabel 4.4 terlihat bahwa nilai rata-rata dari redaman sistem utama sebesar 18,87 N.s/m.

Tabel 4.4 Redaman sistem utama^[1]

Data ke-n	Rata-rata amplitude ke-n (volt)	Rata-rata amplitude ke-n+1 (volt)	C (N.s/m)
1	0,06081	0,04831	21,12
2	0,04831	0,03848	20,88
3	0,03848	0,032385	15,83
4	0,032385	0,02672	17,65
Rata-rata nilai redaman			18,87

4.2.2. Mekanisme CPVA

CPVA sebagai sistem tambahan yang berfungsi meredam getaran yang dihasilkan oleh sistem utama dibuat dengan dimensi 13 cm x 10 cm x 22 cm seperti tampak pada gambar berikut:



Gambar 4.5 Mekanisme CPVA^[1]

Keterangan:

- A. Massa *absorber*
- B. Pegas CPVA
- C. Poros Pengarah
- D. *Piezoelectric*
- E. *Box* CPVA

Untuk massa *absorber* yang dibuat yaitu 0,875 kg yang setara dengan 1/8 dari massa utama sistem simulator getaran. Data diperoleh dengan melakukan penimbangan langsung menggunakan timbangan digital.

Pegas dari mekanisme CPVA disesuaikan berdasarkan frekuensi natural pertama dari sistem utama agar mekanisme CPVA dapat meredam getaran pada frekuensi tersebut, dengan nilai massa absorber 1/8 dari massa utama maka besarnya nilai kekakuan pegas dibuat seperti berikut.

Pegas terbuat dari bahan baja yang pada umumnya memiliki nilai *shear modulus* (G) yaitu 11.500.000 psi, Untuk dimensi dari pegas yaitu :

$$D = 0,06 \text{ inc}$$

$$R = 0,51 \text{ inc}$$

$$N_a = 4$$

Nilai kekakuan pegas diketahui dengan menggunakan persamaan 3.3 sebagai berikut.

$$k = \frac{GD^4}{64N_aR^3}$$

$$k = \frac{(11500000)(0,06)^4}{64(4)(0,51)^3} = 4,08 \frac{\text{lb}}{\text{inc}}$$

$$= 713,66 \text{ N/m}$$

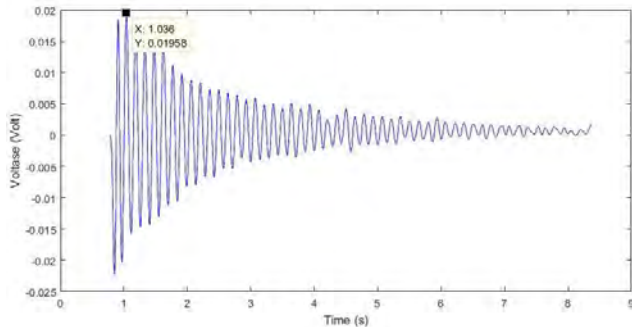
Dimana pegas atas dan pegas bawah memiliki dimensi yang sama dan bahan yang sama sehingga nilai k_{eq} untuk pegas yang disusun secara paralel yaitu $k_{eq} = k_a + k_b$. Diperoleh nilai dari $k_{eq} = 1428.68 \text{ N/m}$ sementara dengan pengujian langsung pada pegas diperoleh data seperti pada tabel berikut.

Tabel 4.5 Pengujian $k_3^{[1]}$

Panjang awal (m)	Beban (N)	Panjang akhir (m)	Selisih panjang (m)	Nilai k (N/m)
0,67	5,5	0,0592	0,0078	705,12
0,67	10	0,0529	0,0141	709,22
0,67	15	0,046	0,021	714,29
0,67	20,1	0,0394	0,0276	728,26
K rata-rata				714,22

Kemudian untuk mengetahui konstanta redaman dari sistem CPVA, maka dilakukan pengujian secara langsung pada sistem. Pengujian dilakukan sama seperti pada pengujian redaman sistem utama. Menggunakan grafik hasil

pengukuran getaran bebas pada sistem CPVA seperti pada gambar 4.8, kemudian memasukkan parameter nilai dari massa absorber sebesar 0,875 kg dan konstanta pegas absorber sebesar 1477,83 N/m diperoleh data redaman sistem CPVA seperti pada tabel 4.6 dengan rata-rata redaman sebesar 1,21 N.s/m.



Gambar 4.6 Grafik hasil pengukuran getaran bebas sistem CPVA dengan *smoothing* dan *filtering*.

Tabel 4.6 Redaman sistem CPVA^[1]

Data ke-n	Rata-rata amplitude ke-n (volt)	Rata-rata amplitude ke-n+1 (volt)	C (N.s/m)
1	0,086675	0,076995	1,35
2	0,076995	0,07217	0,74
3	0,07217	0,065085	1,18
4	0,065085	0,05684	1,55
Rata-rata nilai redaman			1,21

4.3. Permodelan Matematis

4.3.1. Permodelan Matematis Tanpa CPVA

Dari persamaan gerak 2.39 dan 2.40 pada permodelan dinamis pada gambar 2.30, digunakan untuk menemukan nilai frekuensi natural dari sistem utama tanpa CPVA

dengan mengubah persamaan tersebut menjadi bentuk matrix.

$$M_1 \ddot{X}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - (c_1 l_1 - c_2 l_2) \dot{\theta} + (k_1 + k_2 + k_0) x_1 - (k_1 l_1 - k_2 l_2) \theta = k_0 Y$$

$$J_0 \ddot{\theta} + (c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2) \dot{\theta} - (c_1 l_1 - c_2 l_2) \dot{x}_1 + (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) \theta - (k_1 l_1 - k_2 l_2) x_1 = 0$$

Diperoleh:

$$\begin{aligned} [M] &= \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & J_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} \\ [C] &= \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_1 l_1 + c_2 l_2 \\ -c_1 l_1 + c_2 l_2 & c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} \\ [K] &= \begin{bmatrix} (k_1 + k_2 + k_0) & -(k_1 l_1 - k_2 l_2) \\ -(k_1 l_1 - k_2 l_2) & (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \theta \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Persamaan fundamental yang digunakan yaitu:

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F(t) \quad (4.1)$$

Namun nilai frekuensi natural dari suatu sistem hanya dipengaruhi dari nilai k_{eq} dan m_{eq} sehingga $[C]\dot{x}$ dan $F(t)$ dapat diabaikan dan persamaan menjadi seperti persamaan berikut:

$$\begin{aligned} [M]\ddot{x} + [K]x &= 0 \\ \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & J_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2 + k_0) & -(k_1 l_1 - k_2 l_2) \\ -(k_1 l_1 - k_2 l_2) & (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \theta \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} x(t) &= X \cos \omega t \\ \dot{x}(t) &= -X \omega \sin \omega t \end{aligned}$$

$$\ddot{x}(t) = -X\omega^2 \cos \omega t$$

Persamaan 4.2 menjadi:

$$\begin{vmatrix} -\omega^2 M + k_1 + k_2 + k_0 & -k_1 l_1 + k_2 l_2 \\ -k_1 l_1 + k_2 l_2 & -\omega^2 J_0 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 \end{vmatrix} = 0$$

Determinan dari persamaan diatas adalah:

$$\omega^4 M J_0 - \omega^2 M k_1 l_1^2 - \omega^2 M k_2 l_2^2 - \omega^2 J_0 k_1 - \omega^2 J_0 k_2 - \omega^2 J_0 k_0 + k_1^2 l_1^2 + k_1 k_2 l_2^2 + k_2 k_1 l_1^2 + k_2^2 l_2^2 + k_0 k_1 l_1^2 + k_0 k_2 l_2^2 - k_1^2 l_1^2 + k_1 l_1 k_2 l_2 + k_2 l_2 k_1 l_1 - k_2^2 l_2^2 = 0$$

Dengan memasukan nilai parameter:

$$M = 6,7 \text{ kg}$$

$$l_1 = 0,25 \text{ m}$$

$$J_0 = 0,7463 \text{ m}^3$$

$$l_2 = 0,25 \text{ m}$$

$$k_1 = 4700 \text{ N/m}$$

$$k_2 = 7200 \text{ N/m}$$

$$4.425\omega^4 - 15352\omega^2 + 12337695 = 0$$

(4.3)

Dengan menggunakan persamaan abc, dapat diperoleh nilai dari frekuensi naturan (ω_n) sistem utama tanpa CPVA, dimana $\lambda = \omega^2$ maka:

$$\lambda_1, \lambda_2 = \frac{-b \mp \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\lambda_1 = 2205$$

$$\lambda_2 = 1264,4$$

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1} = \sqrt{2205} = 47 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\lambda_2} = \sqrt{1264,4} = 36 \text{ rad/sec}$$

Jika dibawa kedalam bentuk kecepatan putar motor (n) maka,

$$n_1 = \frac{\omega_1 \times 60}{2\pi} = 450 \text{ rpm}$$

$$n_2 = \frac{\omega_2 \times 60}{2\pi} = 350 \text{ rpm}$$

Yang setara dengan :

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 7,1 \text{ hz}$$

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = 5,7 \text{ hz}$$

4.3.2. Permodelan Matematis dengan CPVA

Dari persamaan gerak sistem utama dengan CPVA, digunakan untuk menemukan nilai frekuensi natural dari sistem utama dengan mengubah persamaan tersebut menjadi bentuk matrix. Dimana untuk mencari frekuensi natural sistem dengan penambahan CPVA terdapat 3 DOF dengan 2 massa yaitu massa utama dan massa absorber sesuai pada model dinamis gambar 2.31. Untuk nilai damping dan gaya eksitasi pada persamaan dapat diabaikan sehingga persamaan menjadi seperti pada persamaan berikut.

Persamaan gerak translasi M_1

$$M_1 \ddot{X}_1 + (k_1 + k_2 + k_3 + k_0)x_1 - (k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b)\theta - k_3 x_2 = 0 \quad (4.4)$$

Persamaan gerak rotasi M_1

$$J_0 \ddot{\theta} - (k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b)x_1 + (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 - k_3 b^2)\theta - k_3 b x_2 = 0 \quad (4.5)$$

Persamaan gerak translasi M_2

$$M_2 \ddot{x}_2 + k_3 x_2 - k_3 x_1 - k_3 b \theta = 0 \quad (4.6)$$

Diperoleh matrix :

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2 + k_3 + k_0) & -(k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b) & -k_3 \\ -(k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b) & (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 - k_3 b^2) & -k_3 b \\ -k_3 & -k_3 b & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \theta \\ x_2 \end{Bmatrix}$$

Dengan menjumlahkan matrix [M] dengan matrix [K] maka diperoleh bentuk persamaan sebagai berikut.

$$[M] \ddot{x} + [K] x = 0$$

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2 + k_3 + k_0) & -(k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b)\theta & -k_3 \\ -(k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b) & (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 - k_3 b^2) & -k_3 b \\ -k_3 & -k_3 b & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \theta \\ x_2 \end{Bmatrix} = 0$$

Melakukan analisa fundamental dengan $\lambda = \omega^2$

$$|[K] - \lambda[M]| = 0$$

$$\begin{bmatrix} (k_1 + k_2 + k_3 + k_0) & -(k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b) & -k_3 \\ -(k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b) & (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 - k_3 b^2) & -k_3 b \\ -k_3 & -k_3 b & k_3 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 \end{bmatrix} = 0$$

Atau

$$\begin{bmatrix} (k_1 + k_2 + k_3 + k_0) - \lambda M_1 & -(k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b) & -k_3 \\ -(k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_3 b) & (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 - k_3 b^2) - \lambda J_0 & -k_3 b \\ -k_3 & -k_3 b & k_3 - \lambda M_2 \end{bmatrix} = 0$$

Persamaan diatas dapat diselesaikan dengan mencari nilai determinan dari matrixnya

Untuk jarak $b = 0$ m yaitu posisi CPVA tepat berada pada titik tenga sistem utama. Dengan memasukkan semua nilai dari parameter yang ada kedalam persamaan 4.6 di atas, maka diperoleh persamaan berikut:

$$\begin{vmatrix} 13473,68 - 7\lambda & 900 & -1428,68 \\ 900 & 1020 - 0,746\lambda & 0 \\ -1428,68 & 0 & 1428,68 - 0,875\lambda \end{vmatrix} = 0$$

diperoleh hasil determinannya adalah:

$$-3,851\lambda^3 + 2037,1992\lambda^2 - 32862177,36\lambda + 1,6489 \cdot 10^{10} = 0$$

Sehingga diperoleh 3 buah nilai λ yaitu :

$$\lambda_1 = 2764,91$$

$$\lambda_2 = 1479,59$$

$$\lambda_3 = 1046,63$$

Dimana $\lambda = \omega^2$ maka :

$$\omega_1 = \sqrt{2764.91} = 52,58 \text{ rad/secon}$$

$$\omega_2 = \sqrt{1479.59} = 38,47 \text{ rad/secon}$$

$$\omega_3 = \sqrt{1046.63} = 32,35 \text{ rad/secon}$$

Jika diubah kedalam kecepatan putaran motor maka :

$$n_1 = \frac{\omega_1 \times 60}{2\pi} = 502,1 \text{ rpm}$$

$$n_2 = \frac{\omega_2 \times 60}{2\pi} = 367,36 \text{ rpm}$$

$$n_3 = \frac{\omega_3 \times 60}{2\pi} = 308,92 \text{ rpm}$$

Yang nilainya setara dengan :

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 8,37 \text{ hz}$$

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = 6,12 \text{ hz}$$

$$f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi} = 5,15 \text{ hz}$$

Dengan cara yang sama seperti di atas maka didapatkan pula nilai frekuensi natural untuk sistem dengan CPVA dengan nilai $b_2 = 10 \text{ cm}$ dan $b_3 = 20 \text{ cm}$ sebagaimana dalam tabel berikut:

Tabel 4.7 Frekuensi natural sistem dengan CPVA

Jarak peletakan CPVA (cm)	Frekuensi natural 1 (hz)	Frekuensi natural 2 (hz)	Frekuensi natural 3 (hz)
0	8,73	6,12	5,15
10	8,49	5,77	5,29
20	8,64	5,63	5,06

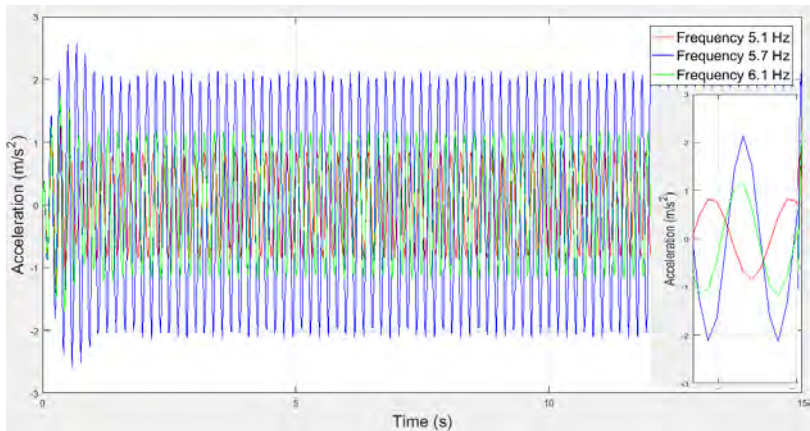
4.4. Analisa Hasil simulasi

4.4.1. Analisa Respon Percepatan Translasi dan Rotasi Massa Utama Tanpa CPVA

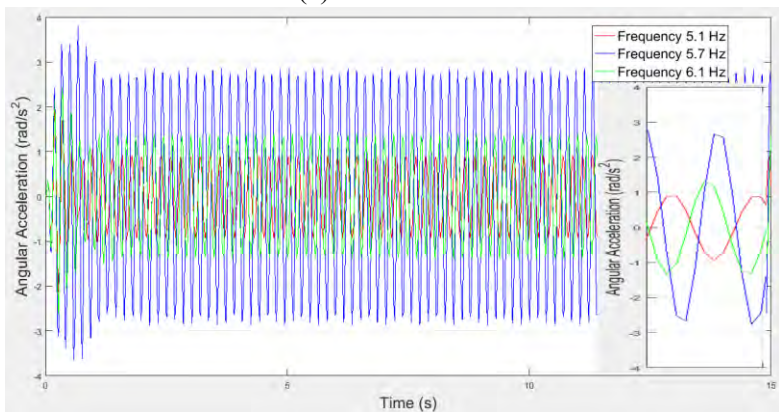
Pada Analisa respon percepatan translasi dan rotasi massa utama tanpa penambahan CPVA, diberikan input variasi frekuensi dengan peningkatan variasi frekuensi operasi sesuai dengan yang telah dilakukan oleh penelitian terdahulu^[1]. Variasi frekuensi yang pertama yang diberikan yaitu 5,1 Hz, variasi frekuensi yang kedua disesuaikan dengan variasi operasi sistem yaitu 5,7 Hz dan variasi frekuensi yang ketiga 6,1 Hz. Parameter

yang digunakan sesuai seperti pada model matematis pada persamaan 4.2.

Hasil yang diperoleh yaitu berupa respon percepatan seperti gambar 4.8 dibawah:



(a) Translasi



(b) Rotasi

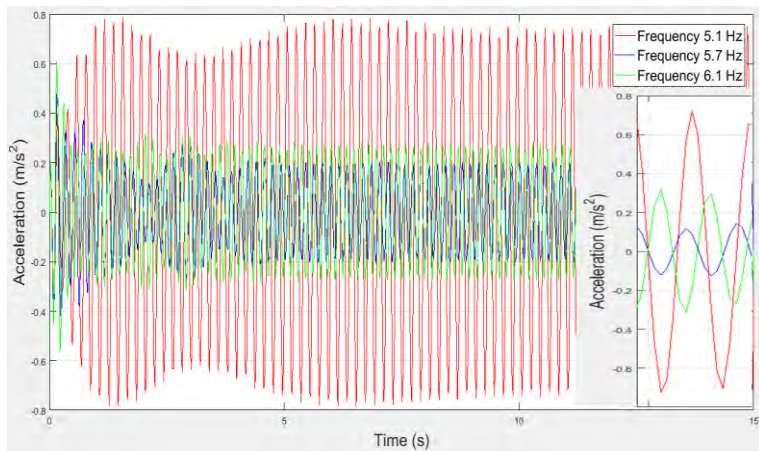
Gambar 4.7 Respon percepatan tanpa CPVA

Pada gambar respon getaran 4.7 (a) dan (b) diatas untuk garis merah menunjukan frekuensi 5,1 hz, untuk warna biru frekuensi 5,7 hz dan untuk warna hijau frekuensi 6,1 hz. Dari grafik tersebut terlihat bahwa frekuensi 5,7 hz mempunyai nilai amplitude yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan frekuensi 5,7 hz merupakan frekuensi natural dari sistem. Berdasarkan nilai RMS percepatan pada frekuensi 5,7 hz yang diperoleh dari proses simulasi didapatkan nilai $1,3602 \text{ m/s}^2$ untuk arah translasi dan $1,8215 \text{ rad/s}^2$ untuk arah rotasi.

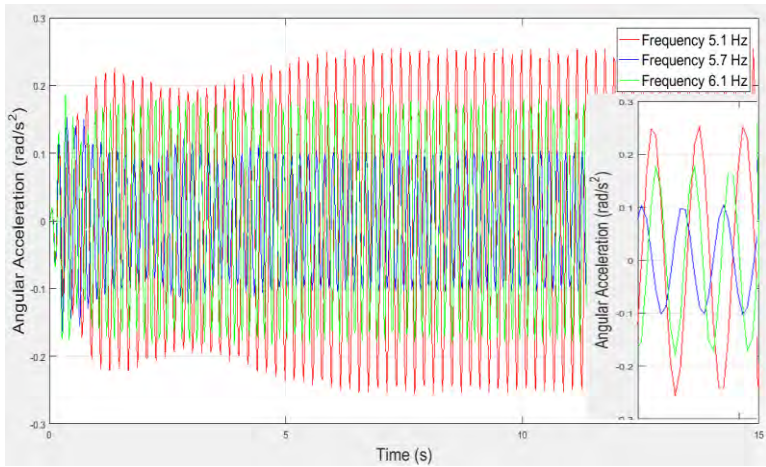
4.4.2. Analisa Respon Percepatan Massa Utama Dengan Peletakan CPVA 0 cm

4.4.5. Analisa Mekanisme Sistem Utama Pada Jarak CPVA $b_1 = 0 \text{ cm}$ dengan jumlah *piezoelectric* 8 buah

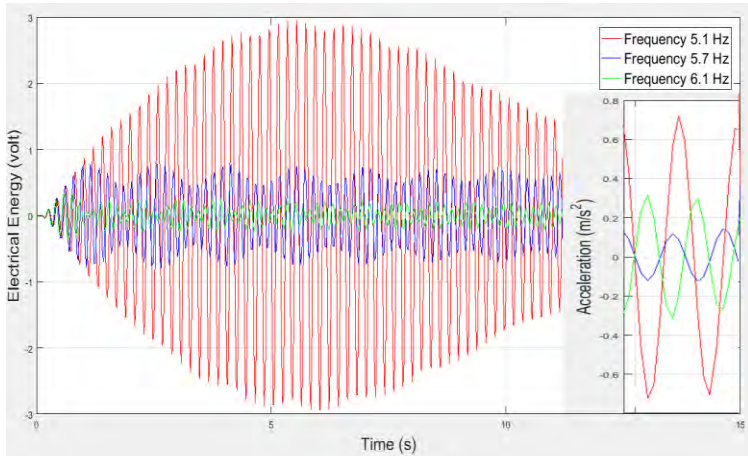
Penempatan CPVA pada jarak 0 cm Hasil Respon percepatan translasi dan rotasi serta Energi listrik bangkitan pada penempatan CPVA 0 cm dari titik pusat massa hasil dari simulasi dengan jumlah *piezoelectric* 8 buah sebagai berikut:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.8 (a) Percepatan Arah Translasi (b) Percepatan Arah Rotasi (c) Energi Listrik bangkitan pada penempatan CPVA 0 cm dengan jumlah *piezoelectric* 8 buah

Pada gambar 4.8 (a) merupakan hasil respon percepatan arah translasi, untuk input frekuensi 5,1 hz digambarkan dengan respon berwarna merah, untuk frekuensi input 5,7 hz digambarkan dengan respon berwarna biru dan untuk input frekuensi 6,1 hz digambarkan dengan respon warna hijau. Terlihat bahwa amplitudo yang paling besar pada frekuensi 5,1 hz dan amplitudo yang paling kecil pada frekuensi 5,7 hz. Pada gambar 4.8 (b) warna dari respon input frekuensi sama seperti pada gambar 4.9 (a) dengan nilai amplitudo pada percepatan rotasi yang paling besar di frekuensi 5,1 hz dan yang paling kecil di frekuensi 6,1 hz. pada gambar 4.8 (c) digambarkan untuk respon frekuensi sama seperti pada gambar 4.8 (a) dan (b). terlihat bahwa Energi listrik bangkitan (volt) yang terbesar pada frekuensi 5,1 hz dan yang paling kecil pada frekuensi 6,1 hz.

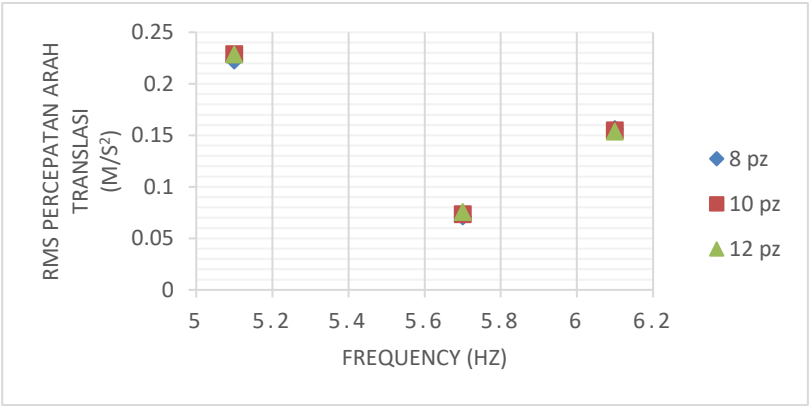
4.4.6. Pengaruh Frekuensi dan Jumlah *Piezoelectric* Terhadap Respon Percepatan dan Energi Listrik Bangkitan

Dari analisa yang dilakukan pada subbab 4.4.2.1 didapat respon percepatan dan Energi listrik bangkitan pada tabel 4.8 berikut:

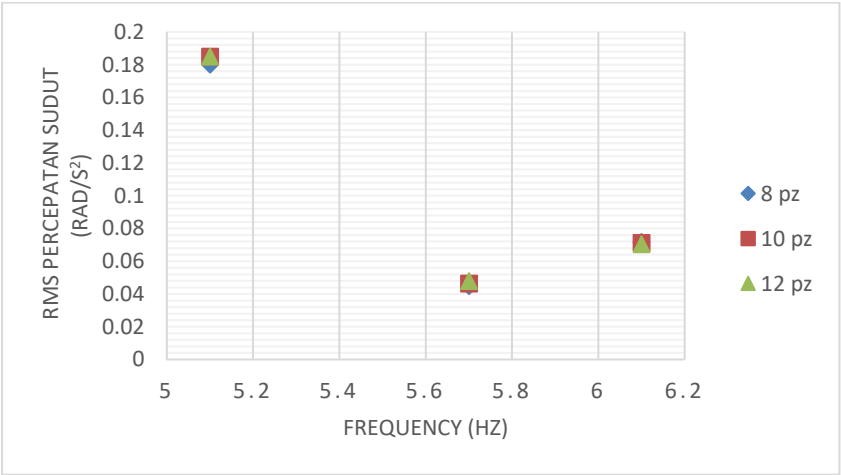
Tabel 4.8 RMS Respon percepatan dan Energi listrik bangkitan dengan CPVA (b₁)

Frekuensi (Hz)	Translasi (m/s ²)			Rotasi (rad/s ²)			Energi listrik bangkitan (volt)		
	8 pz	10 pz	12 pz	8 pz	10 pz	12 pz	8 pz	10 pz	12 pz
5.1	0.22	0.23	0.23	0.18	0.18	0.18	1.42	1.15	0.98
5.7	0.07	0.07	0.08	0.04	0.05	0.05	0.13	0.12	0.12
6.1	0.15	0.15	0.15	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05

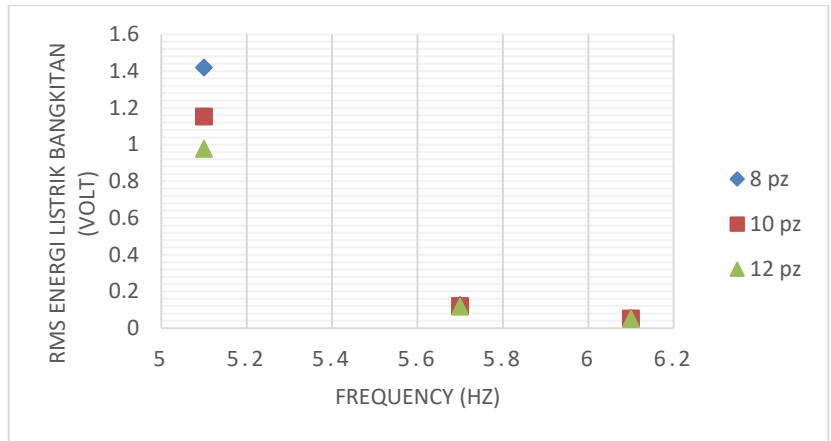
Dari tabel 4.8 diatas, digrafikan sebagai berikut:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(C) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.9 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan Energi listrik bangkitan

Grafik respon percepatan pada gambar 4.9 (a) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,2228 \text{ m/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi nilai RMS semakin menurun dengan nilai $0,0713 \text{ m/s}^2$, dan pada inputan frekuensi 6.1 hz nilai RMS kembali naik dengan nilai $0,1561 \text{ m/s}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak translasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5,7 hz atau pada frekuensi operasinya. Untuk nilai RMS pada Piezoelectric 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

Pada Gambar grafik 4.9 (b) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,1799 \text{ rad/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi nilai RMS semakin menurun dengan nilai $0,0447 \text{ rad/s}^2$, dan pada inputan frekuensi 6.1 hz nilai RMS kembali naik dengan nilai $0,0716 \text{ rad/s}^2$. Hal ini menunjukkan

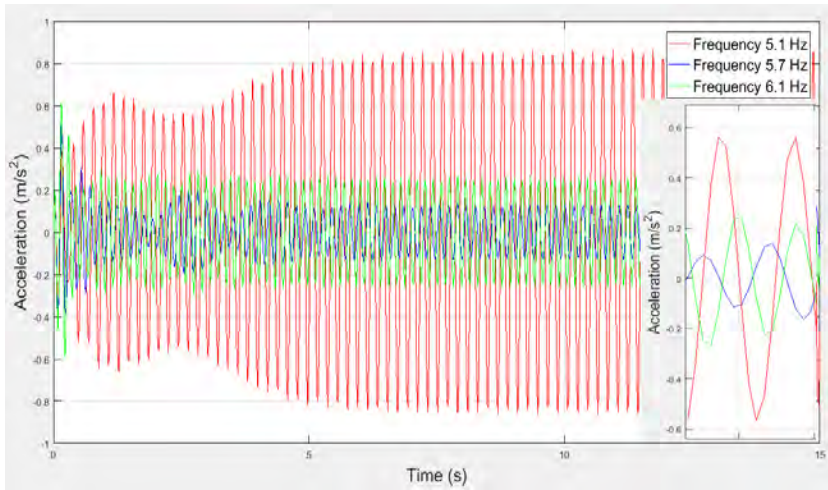
bahwa untuk gerak rotasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5,7 hz atau pada frekuensi operasinya. Untuk nilai RMS pada Piezoelektrik 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

Pada gambar grafik 4.9 (c) terlihat bahwa nilai frekuensi semakin kecil maka bangkitan listriknya akan semakin besar. Listrik terbesar bisa didapatkan dengan nilai 1,4195 volt pada frekuensi 5,1 hz dan semakin sedikit jumlah *piezoelectric* maka listrik yang dihasilkan juga semakin besar.

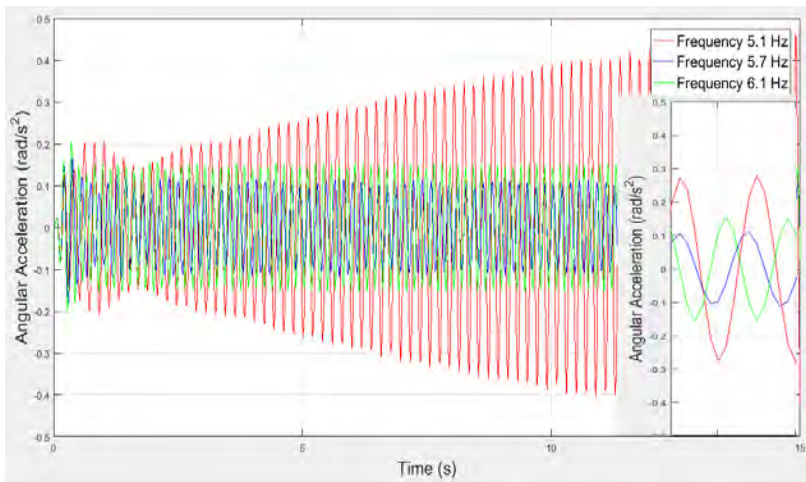
4.4.3. Analisa Respon Percepatan Massa Utama Dengan Peletakan CPVA 10 cm

4.4.3.1. Analisa Mekanisme Sistem Utama Pada Jarak CPVA $b_2 = 10$ cm dengan jumlah *piezoelectric* 8 buah

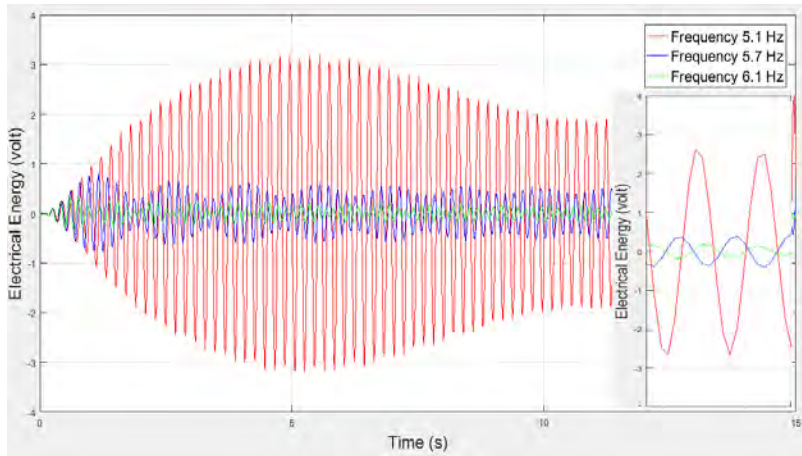
Hasil Respon percepatan massa utama arah translasi dan rotasi serta energi listrik bangkitan untuk jarak penempatan CPVA $b_2 = 10$ cm dari titik pusat massa utama didapatkan respon sebagai berikut:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi Listrik Bangkitan

Gambar 4.10 (a) Percepatan Arah Translasi (b) Arah Rotasi (c) Energi Listrik bangkitan pada penempatan CPVA 10 cm dengan jumlah *piezoelectric* 8 buah

Pada gambar 4.10 (a) merupakan hasil respon percepatan arah translasi, untuk input frekuensi 5,1 hz digambarkan dengan respon berwarna merah, untuk frekuensi input 5,7 hz digambarkan dengan respon berwarna biru dan untuk input frekuensi 6,1 hz digambarkan dengan respon warna hijau. Terlihat bahwa amplitudo yang paling besar pada frekuensi 5,1 hz dan amplitudo yang paling kecil pada frekuensi 5,7 hz. Pada gambar 4.10 (b) warna dari respon input frekuensi sama seperti pada gambar 4.10 (a) dengan nilai amplitudo mengalami kenaikan seiring interval waktu, akan tetapi akan stabil pada interval waktu tertentu. pada percepatan rotasi yang paling besar di frekuensi 5,1 hz dan yang paling kecil di frekuensi 6,1 hz. pada gambar 4.10 (c) digambarkan untuk respon frekuensi sama seperti pada gambar 4.9 (a) dan (b). terlihat bahwa Energi listrik bangkitan (volt) yang

terbesar pada frekuensi 5,1 hz dan yang paling kecil pada frekuensi 6,1 hz.

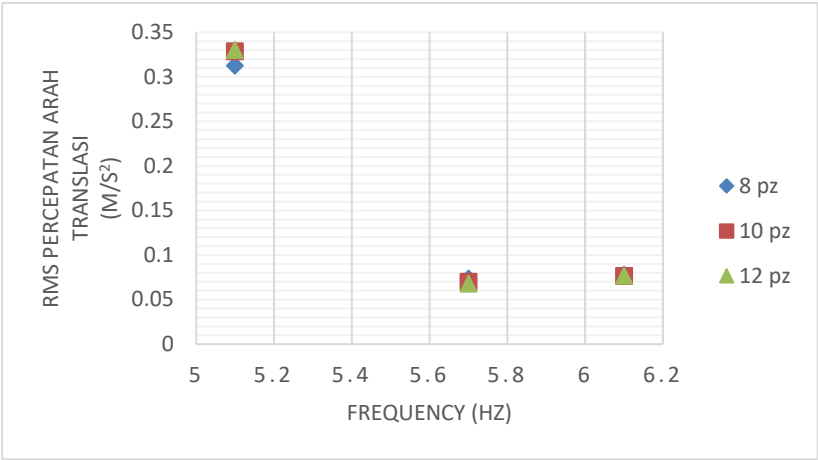
4.4.3.2. Pengaruh Frekuensi dan Jumlah *Piezoelectric* Terhadap Respon Percepatan dan Energi Listrik Bangkitan

Dari analisa yang dilakukan pada subbab 4.4.3.1 didapat respon percepatan dan Energi listrik bangkitan seperti pada tabel 4.9 berikut:

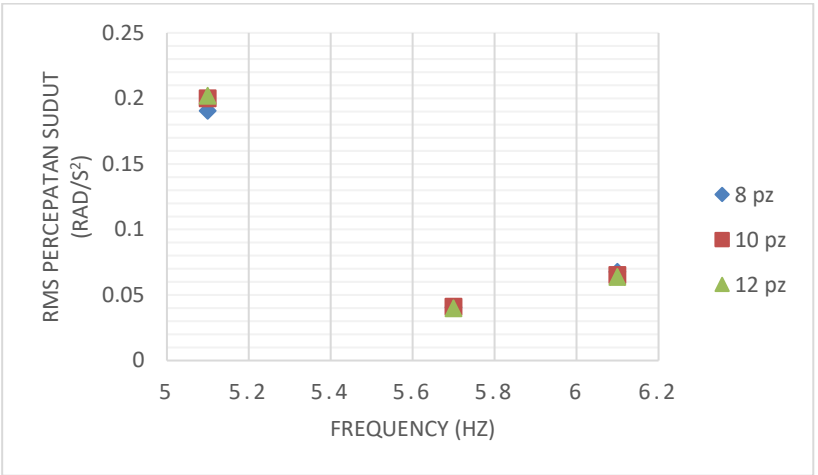
Tabel 4.9 RMS Respon percepatan dan Energi listrik bangkitan dengan CPVA (b_2)

Frekuensi (Hz)	Translasi (m/s ²)			Rotasi (rad/s ²)			Energi Listrik Bangkitan (volt)		
	8 pz	10 pz	12 pz	8 pz	10 pz	12 pz	8 pz	10 pz	12 pz
5.1	0.31	0.33	0.33	0.19	0.2	0.20	1.73	1.44	1.24
5.7	0.07	0.07	0.07	0.04	0.04	0.04	0.12	0.11	0.11
6.1	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.10	0.09	0.05

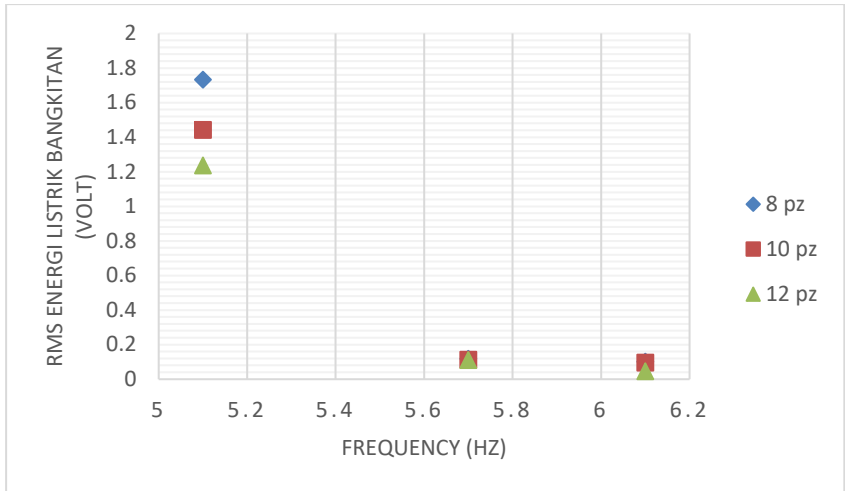
Dari tabel 4.9 diatas, di grafikan sebagai berikut:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.11 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan Energi listrik bangkitan

Grafik respon percepatan pada gambar 4.11 (a) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,3126 \text{ m/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi nilai RMS semakin menurun dengan nilai $0,0736 \text{ m/s}^2$, dan pada inputan frekuensi 6,1 hz nilai RMS kembali naik dengan nilai $0,078 \text{ m/s}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak translasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5,7 hz atau pada frekuensi operasinya. Untuk nilai RMS pada Piezoelektrik 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

Pada Gambar grafik 4.11 (b) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5.1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,1905 \text{ rad/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi 5,7 hz nilai RMS semakin menurun dengan nilai

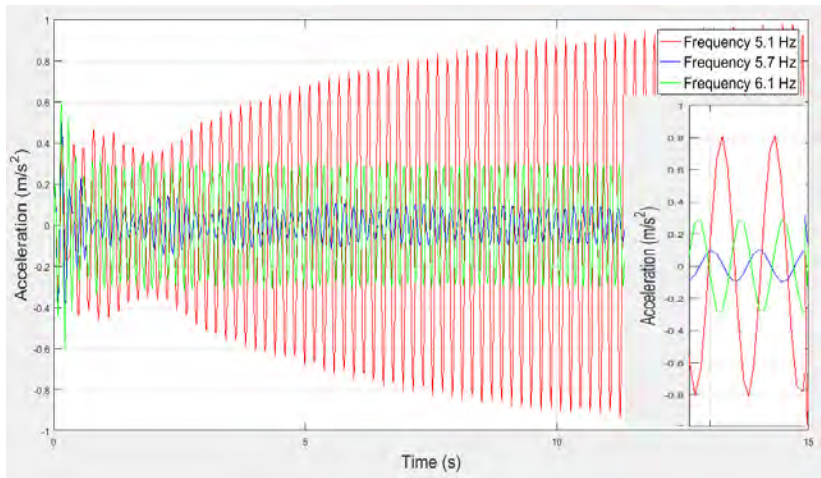
0,0404 rad/s^2 , dan pada inputan frekuensi 6.1 hz nilai RMS kembali naik dengan nilai 0,06759 rad/s^2 . Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak rotasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5,7 hz atau pada frekuensi operasinya. Untuk nilai RMS pada Piezoelektrik 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

Pada gambar grafik 4.11 (c) terlihat bahwa nilai frekuensi semakin kecil maka bangkitan listriknnya akan semakin besar. Listrik terbesar bisa didapatkan dengan nilai 1,7327 volt pada frekuensi 5,1 hz dan semakin sedikit jumlah *piezoelectric* maka listrik yang dihasilkan juga semakin besar.

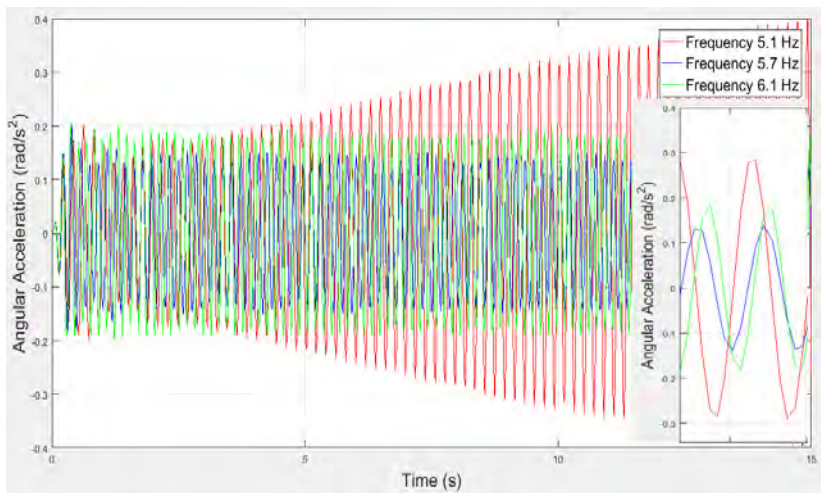
4.4.4. Analisa Respon Percepatan Massa Utama Dengan Peletakan CPVA 20 cm

4.4.4.1. Analisa Mekanisme Sistem Utama Pada Jarak CPVA $b_3 = 20$ cm dengan jumlah *piezoelectric* 8 buah

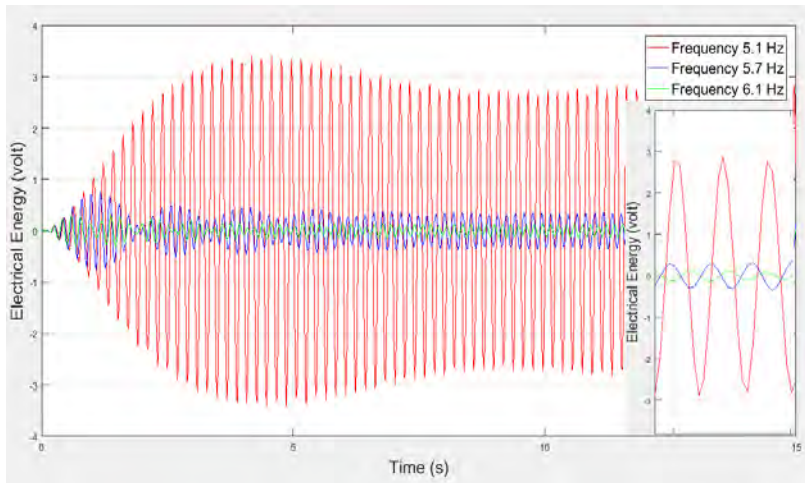
Hasil respon percepatan translasi dan rotasi serta Energi listrik bangkitan untuk jarak penempatan CPVA $b_3 = 20$ cm dari titik pusat massa utama didapatkan respon sebagai berikut:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.12 (a) Percepatan Arah Translasi (b) Arah Rotasi (c) Energi Listrik bangkitan pada penempatan CPVA 20 cm

Pada gambar 4.12 (a) merupakan hasil respon percepatan arah translasi, untuk input frekuensi 5,1 hz digambarkan dengan respon berwarna merah, untuk frekuensi input 5,7 hz digambarkan dengan respon berwarna biru dan untuk input frekuensi 6,1 hz digambarkan dengan respon warna hijau. Terlihat bahwa amplitudo yang paling besar pada frekuensi 5,1 hz dengan respon yang membuat amplitudo semakin besar seiring bertambahnya waktu, akan tetapi respon percepatan arah translasi akan stabil pada interval waktu tertentu. Amplitudo yang paling kecil pada frekuensi 5,7 hz. Pada gambar 4.12 (b) warna dari respon input frekuensi sama seperti pada gambar 4.12 (a) dengan nilai amplitudo mengalami kenaikan seiring bertambahnya waktu, akan tetapi akan stabil pada interval waktu tertentu. pada percepatan rotasi yang paling besar di frekuensi 5,1 hz dan yang paling kecil di frekuensi 6,1 hz. pada gambar 4.12 (c)

digambarkan untuk respon frekuensi sama seperti pada gambar 4.9 (a) dan (b). terlihat bahwa Energi listrik bangkitan (volt) yang terbesar pada frekuensi 5,1 hz dan yang paling kecil pada frekuensi 6,1 hz.

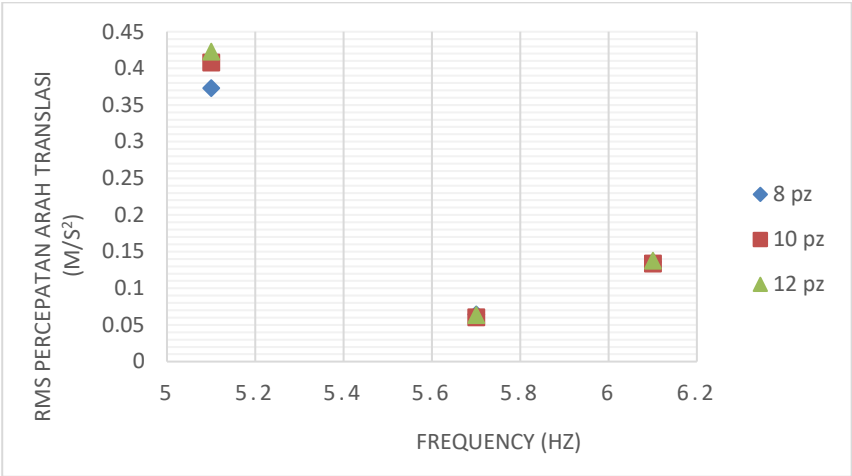
4.4.4.2. Pengaruh Frekuensi dan Jumlah *Piezoelectric* Terhadap Respon Percepatan dan Energi Listrik Bangkitan

Dari analisa yang dilakukan pada subbab 4.4.2.1 didapat respon percepatan dan Energi listrik bangkitan seperti pada tabel 4.10 berikut:

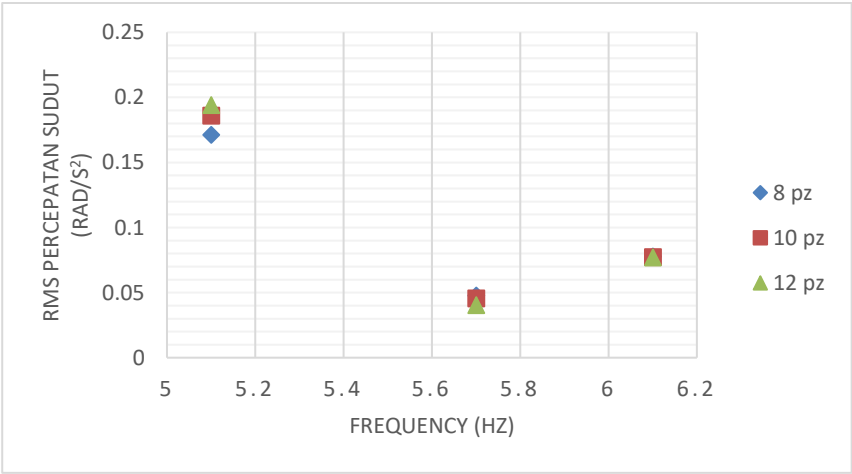
Tabel 4.10 Respon percepatan dan Energi listrik bangkitan dengan CPVA (b_3)

Frekuensi (Hz)	Translasi (m/s ²)			Rotasi (rad/s ²)			Energi Listrik Bangkitan (volt)		
	8 pz	10 pz	12 pz	8 pz	10 pz	12 pz	8 pz	10 pz	12 pz
5.1	0.373	0.4078	0.4229	0.1714	0.186	0.1943	1.9342	1.6715	1.4763
5.7	0.0642	0.0605	0.06337	0.0478	0.0457	0.0404	0.1194	0.1179	0.1253
6.1	0.1359	0.1336	0.1377	0.0778	0.0774	0.0771	0.0854	0.0829	0.0811

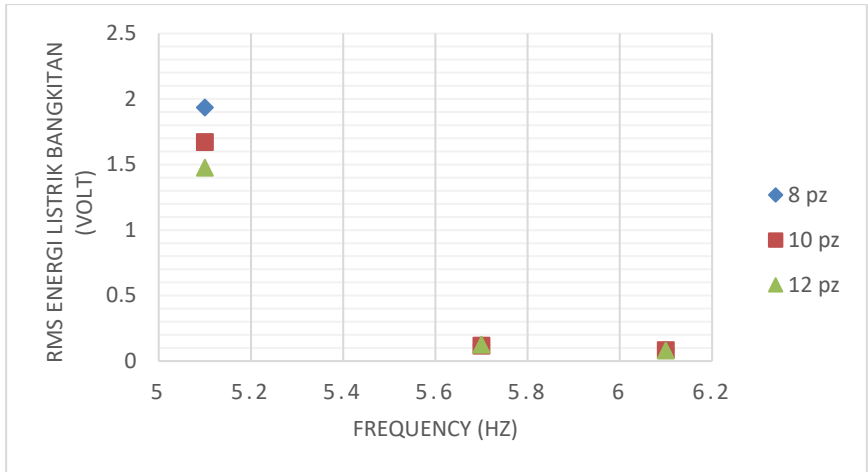
Dari tabel 4.10 diatas, di grafikan sebagai berikut:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.13 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan Energi listrik bangkitan

Gambar grafik 4.13 (a) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,373 \text{ m/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi nilai RMS semakin menurun dengan nilai $0,0642 \text{ m/s}^2$, dan pada inputan frekuensi 6,1 hz nilai RMS kembali naik dengan nilai $0,1359 \text{ m/s}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak translasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5,7 hz atau pada frekuensi operasinya. Untuk nilai RMS pada Piezoelectric 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

Pada Gambar grafik 4.13 (b) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,1714 \text{ rad/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi nilai RMS semakin menurun dengan nilai $0,0478 \text{ rad/s}^2$, dan pada inputan frekuensi 6,1 hz nilai RMS kembali naik dengan nilai $0,0778 \text{ rad/s}^2$. Hal ini menunjukkan

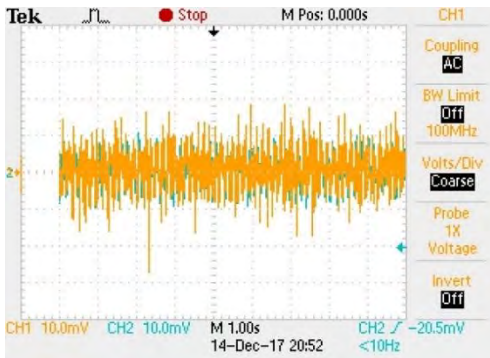
bahwa untuk gerak rotasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5.7 hz atau pada frekuensi operasinya. Untuk nilai RMS pada Piezoelectrik 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

Pada gambar grafik 4.13 (c) terlihat bahwa nilai frekuensi semakin kecil maka bangkitan listriknya akan semakin besar. Listrik terbesar bisa didapatkan dengan nilai 1,9342 volt pada frekuensi 5,1 hz dan semakin sedikit jumlah *piezoelectric* maka listrik yang dihasilkan juga semakin besar.

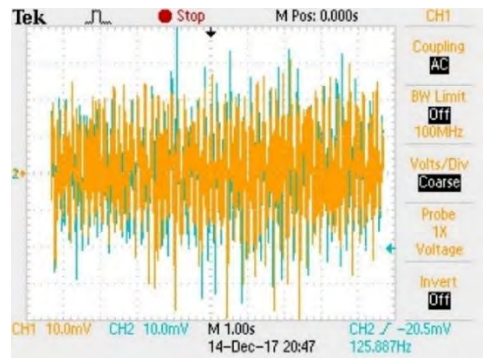
4.5. Analisa Hasil Eksperimen

4.5.1. Analisa Meakanisme Sistem Utama Tanpa CPVA

Pengujian tanpa CPVA dilakukan dengan cara pengujian secara langsung pada alat simulator getaran dengan meniadakan CPVA. Dalam kondisi ini sistem hanya memiliki dua derajat kebebasan saja, yaitu pada arah translasi dan rotasi. Gambar 4.10 berikut ini memperlihatkan hasil dari alat oscilloscope respon percepatan arah translasi dan rotasi pada sistem massa utama dengan input frekuensi 5,7 hz dan 7,1 hz sesuai dengan hasil persamaan 4.2 pada sub bab permodelan matematis tanpa CPVA.



(a) 7.1 hz



(b) 5.7 hz

Gambar 4.14 Respon percepatan arah translasi

Dari gambar 4.14 (a) dan (b) terlihat bahwa untuk respon percepatan arah translasi pada probe titik tengah di tujuan oleh warna orange dan untuk respon percepatan arah translasi dari probe titik ujung sistem ditunjukkan oleh warna biru. Dari kedua gambar terlihat bahwa amplitude yang terbesar ditunjukkan pada input frekuensi 5,7 hz, hal ini dibuktikan pula dari hasil RMS yang didapat setelah dilakukan *filtering* dan *smoothing* didapat nilai respon percepatan massa utama pada arah translasi sebesar $1,2944 \text{ m/s}^2$ dan $1,7474 \text{ rad/s}^2$ untuk arah rotasi sedangkan pada frekuensi 7,1 hz di dapatkan nilai RMS sebesar 0.348 m/s^2 arah translasi dan $0,426 \text{ rad/s}^2$ untuh percepatan arah rotasi. Dari nilai RMS tersebut mebukitkan bahwa frekuensi operasi dari sistem berada pada frekuensi 5,7 hz karena mempunyai nilai respon percepatan arah translasi dan rotasi yang terbesar. Nilai RMS percepatan arah tranlasi dan rotasi dengan input frekuensi 5,7 hz dan 7,1 hz diperoleh melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

Data yang diperoleh dari alat oscilloscope berupa angka dengan satuan volt dalam bentuk excel yang meski diolah

agar data yang dihasilkan dalam bentuk percepatan (m/s^2) berikut contoh cara mengubah data tersebut :

- Diketahui bahwa *probe accelerometer* memiliki nilai konversi yaitu

$$\ddot{x} = G \frac{g}{10 \text{ mV}} = G \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{10 \text{ mV}}$$

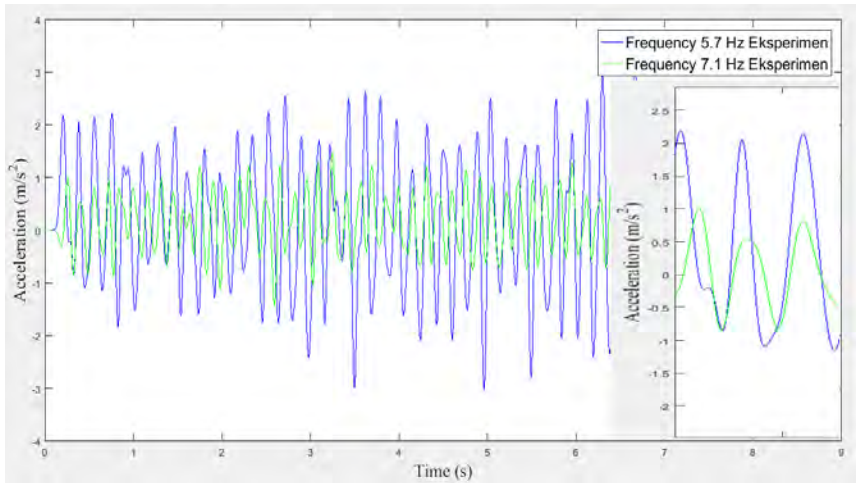
- Untuk nilai G diperoleh dari data angka pada excel dikalikan dengan skala pembacaan pada oscilloscope. Misal data angka yang diperoleh adalah 0.6211 kemudian skala pembacaan pada oscilloscope adalah 10.0 mv maka.

$$\ddot{x} = (0.6211 \times 10.0 \text{ mV}) \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{10 \text{ mV}}$$

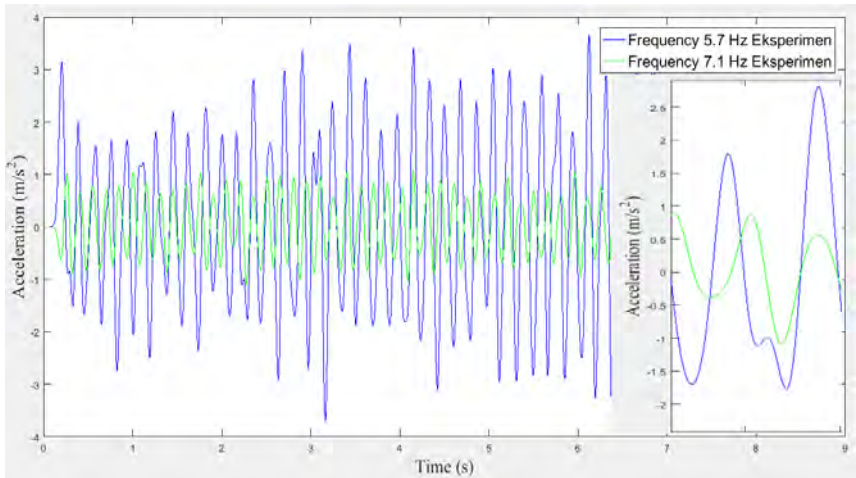
$$\ddot{x} = 6.09 \text{ m/s}^2$$

Dimana untuk setiap chanel pada oscilloscope diperoleh setiap pengukuran didapat 2500 data (G_1). Semua data harus dikonversi ke percepatan. Setelah didapatkan hasil data setelah konversi ke percepatan maka selanjutnya data diolah kembali di program matlab untuk di *filtering* dan *smoothing* untuk menghilangkan *noise* dan memperoleh nilai RMS.

Berikut hasil olahan data yang didapat ketika tanpa CPVA dengan variasi input frekuensi 5,7 hz dan 7,1 hz untuk respon percepatan arah translasi:



(a) Translasi pada titik tengah massa utama



(b) Translasi pada massa titik ujung massa utama

Gambar 4.15 Respon percepatan massa utama tanpa CPVA

Pada gambar 4.15 (a) dan (b) respon percepatan arah tranlasi pada titik tengah massa utama maupun pada translasi pada ujung massa utama digambarkan oleh warna biru untuk input frekuensi 5,7 hz dan 7,1 hz digambarkan oleh respon warna hijau. Dari grafik respon yang didapatkan terlihat bahwa amplitude dari frekuensi 5,7 hz mempunyai nilai yang terbesar. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi natural dari sistem berada pada frekuensi 5,7 hz.

Pengujian dilakukan menggunakan 2 buah *probe accelerometer* yang mana *probe* pertama diletakkan di tengah massa utama dan *probe* yang kedua diletakkan di ujung massa utama dengan jarak 20 cm antara *probe* 1 dengan *probe* yang ke 2, sehingga diperoleh 2 buah grafik respon percepatan. Grafik respon pada titik tengah menggambarkan respon percepatan kearah translasi dan untuk respon percepatan sudut kearah rotasinya digunakan persamaan berikut:

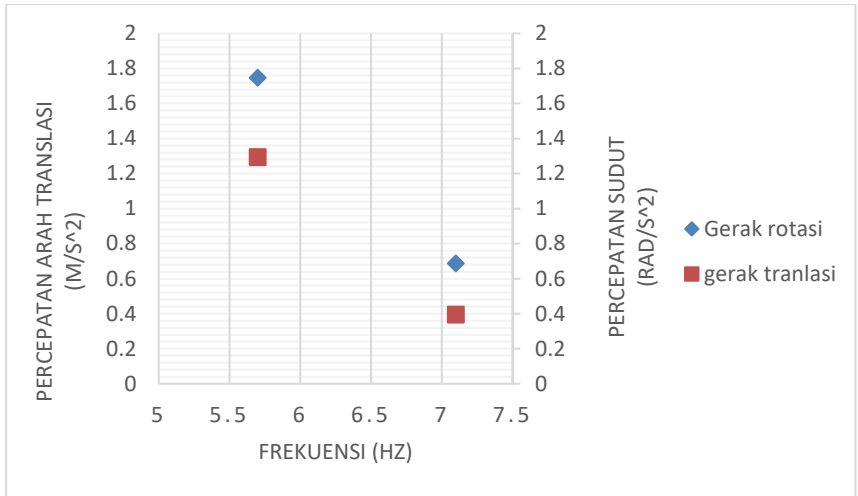
$$\ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}}{l}$$

Dimana \ddot{x} = respon pada titik ujung (\ddot{x}_2) – respon pada titik tengah (\ddot{x}_1)

Maka :

$$\ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}_2 - \ddot{x}_1}{l}$$

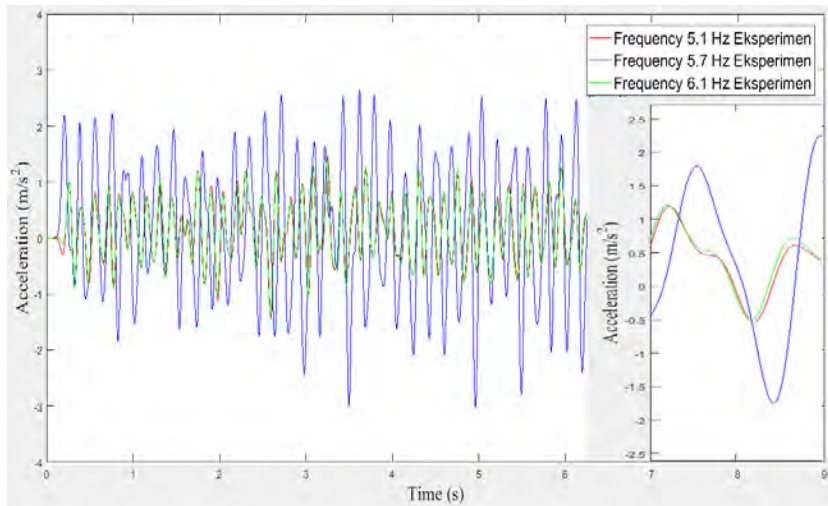
Berikut nilai RMS yang telah digrafikan Berdasarkan gambar 4.15 terlihat bahwa respon percepatan terbesar terjadi saat frekuensi eksitasi sebesar 5.7 hz dimana frekuensi tersebut merupakan frekuensi natural pertama dari sistem utama tanpa penambahan CPVA. Dari grafik diatas, diperoleh nilai RMS untuk tiap fariasi frekuensi yang dapat digambarkan seperti pada grafik berikut:



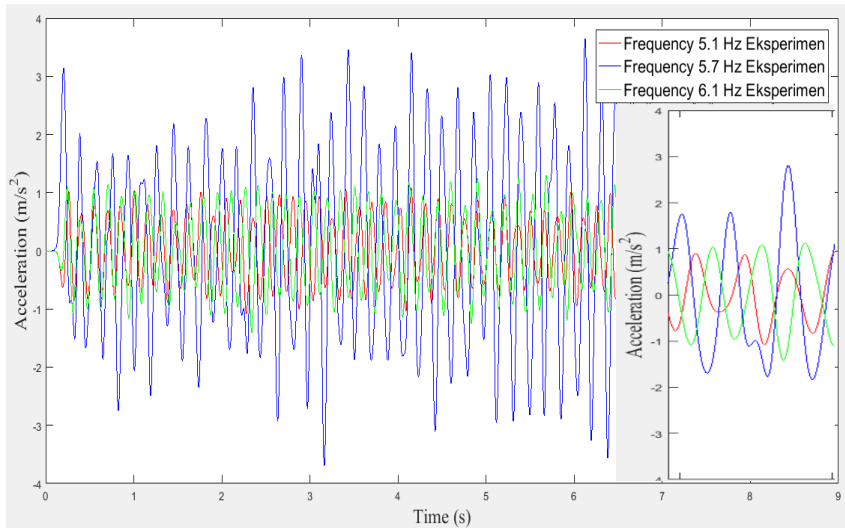
Gambar 4.16 Respon Percepatan arah translasi dan rotasi pada massa utama tanpa CPVA

Pada gambar 4.16 terlihat perubahan frekuensi eksitasi yang dilakukan tidak hanya berpengaruh pada respon percepatan translasi pada sistem utama, namun berpengaruh juga terhadap respon percepatan sudutnya. Tampak bahwa untuk respon percepatan sudut dengan respon percepatan translasi memiliki bentuk grafik yang serupa, dimana respon percepatannya meningkat drastis pada frekuensi 5,7 hz dan turun pada frekuensi 7.1 hz, hal ini menunjukkan bahwa sistem utama adalah sistem yang terkopel. Nilai RMS yang untuk respon percepatan arah translasi pada frekuensi 5,7 hz didapatkan $1,2944 \text{ m/s}^2$ dan $1,7474 \text{ rad/s}^2$ untuk respon arah percepatan rotasi. Pada frekuensi 7.1 hz didapatkan nilai RMS gerak translasi sebesar $0,3942 \text{ m/s}^2$ dan 0.6973 rad/s^2 untuk gerak rotasi. Dari kedua variasi frekuensi, nilai RMS terbesar didapatkan pada frekuensi natural sistem yaitu 5,7 hz.

Variasi yang diberikan pada penelitian ini yaitu 5,1 hz, 5,7 hz, dan 6,1 hz. Berikut hasil respon percepatan arah translasi pada titik tengah massa utama maupun gerak translasi pada ujung massa utama didapatkan dari pengujian eksperimen:



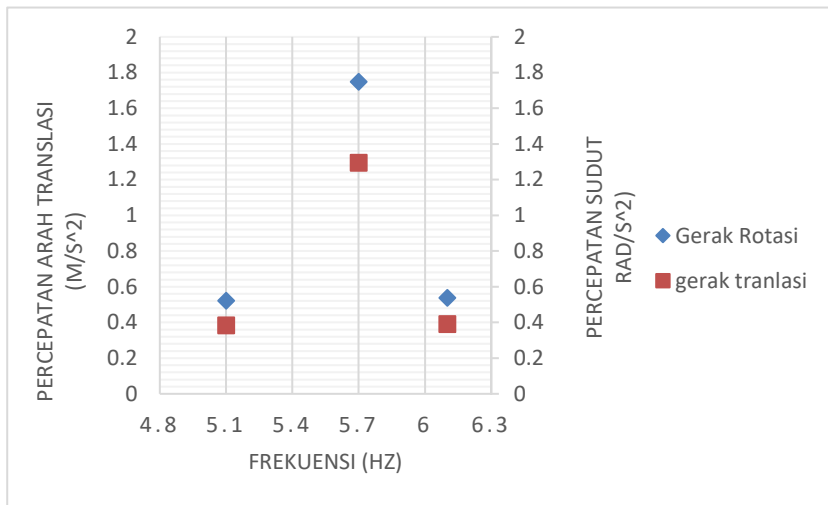
(a) Translasi pada titik tengah massa utama



(b) Translasi pada ujung massa utama

Gambar 4.17 Respon Percepatan pada massa utama tanpa CPVA

Berikut nilai RMS yang telah digrafikan Berdasarkan gambar 4.17 terlihat bahwa respon percepatan terbesar terjadi saat frekuensi eksitasi sebesar 5.7 hz dibandingkan pada frekuensi 5,1 hz dan 7,1 hz dimana frekuensi 5,7 hz tersebut merupakan frekuensi natural pertama dari sistem utama tanpa penambahan CPVA. Dari grafik diatas, diperoleh nilai RMS untuk tiap variasi frekuensi yang dapat digambarkan seperti pada grafik berikut:



Gambar 4.18 grafik respon percepatan pada frekuensi 5,1 hz, 5,7 hz dan 6,1 hz

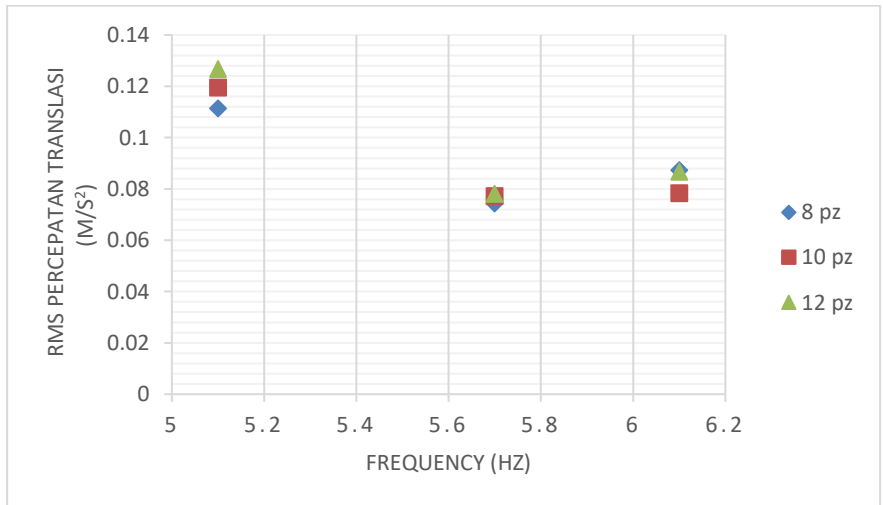
Pada gambar 4.18 terlihat perubahan frekuensi eksitasi yang dilakukan tidak hanya berpengaruh pada respon percepatan translasi pada sistem utama, namun berpengaruh juga terhadap respon percepatan sudutnya. Nilai Rms percepatan akan meningkat pada frekuensi natural 5,7 hz dan akan kembali turun pada frekuensi 6,1 hz. Nilai RMS pada frekuensi 5,1 hz didapatkan nilai respon percepatan arah traslasi sebesar $0,3833 \text{ m/s}^2$ dan $0,521 \text{ rad/s}^2$ gerak rotasi, untuk frekuensi 5,7 hz didapatkan nilai RMS percepatan arah translasi sebesar $1,2944 \text{ m/s}^2$ dan $1,7474 \text{ rad/s}^2$ untuk arah rotasi, dan pada frekuensi 6.1 didapatkan nilai respon percepatan arah translasi 0.3903 m/s^2 dan $0,5365 \text{ rad/s}^2$ gerak rotasi. Dari beberapa frekuensi variasi inputan dapat disimpulkan bahwa nilai RMS percepatana translasi dan rotasi didapatkan nilai yang terbesar pada fekuensi natural sistem

5,7 hz dengan nilai RMS percepatan arah translasi 1,2944 m/s² dan 1,7474 rad/s² gerak rotasi.

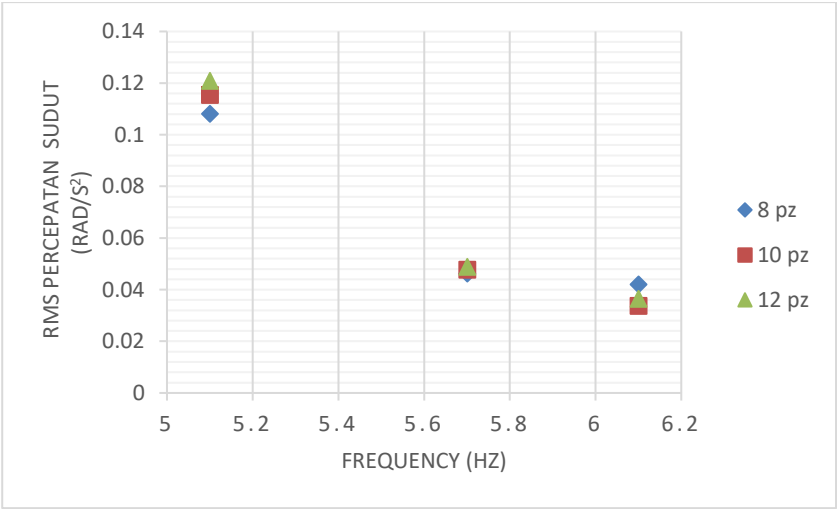
4.5.2. Analisa Mekanisme Sistem Massa Utama dengan CPVA

4.5.2.1. Analisa Mekanisme Sistem Massa Utama dengan CPVA pada jarak $b_1 = 0$ cm

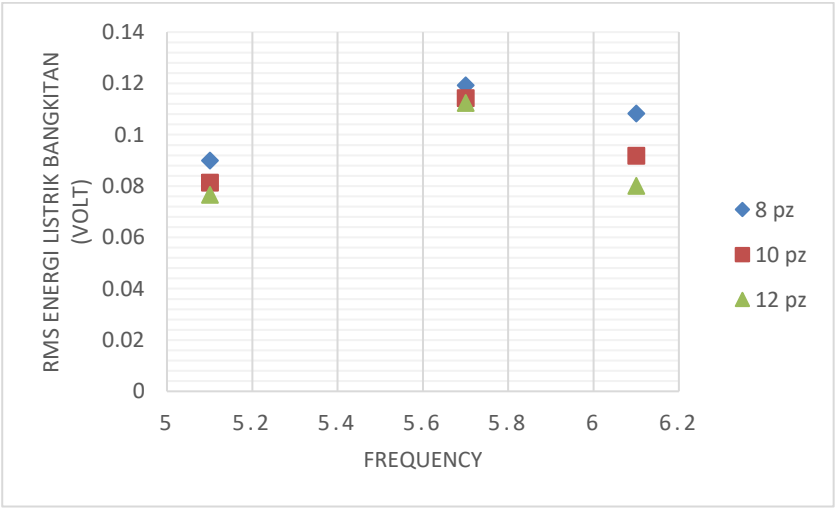
Hasil Respon getaran untuk jarak penempatan CPVA $b_1 = 0$ cm dari titik pusat massa utama berikut hasil RMS yang telah digrafikan pada gambar 4.19:



(a) Translasi



(b). Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.19 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan Energi listrik bangkitan dengan peletakan CPVA 0 cm

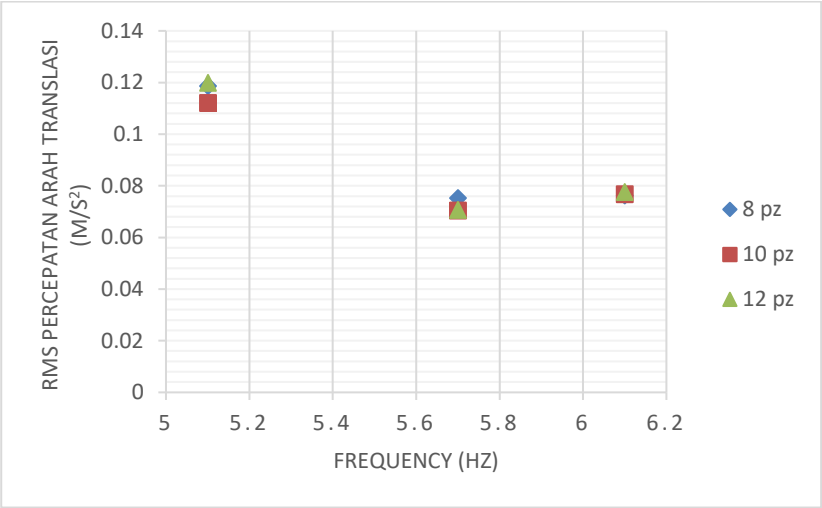
Gambar grafik 4.19 (a) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar 0,11143 m/s². ketika pada inputan frekuensi operasi 5,7 hz nilai RMS semakin menurun dengan nilai 0,0743 m/s², dan pada inputan frekuensi 6,1 hz nilai RMS kembali naik dengan nilai 0,08733 m/s². Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak translasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5,7 hz atau pada frekuensi operasinya. Untuk nilai RMS pada Piezoelektrik 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

Pada Gambar grafik 4.19 (b) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar 0,10803 rad/s². ketika pada inputan frekuensi operasi nilai RMS semakin menurun dengan nilai 0,04623 rad/s², dan pada inputan frekuensi 6,1 hz nilai RMS kembali turun dengan nilai 0,04196 rad/s². Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak rotasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 6,1 hz. Untuk nilai RMS pada Piezoelektrik 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

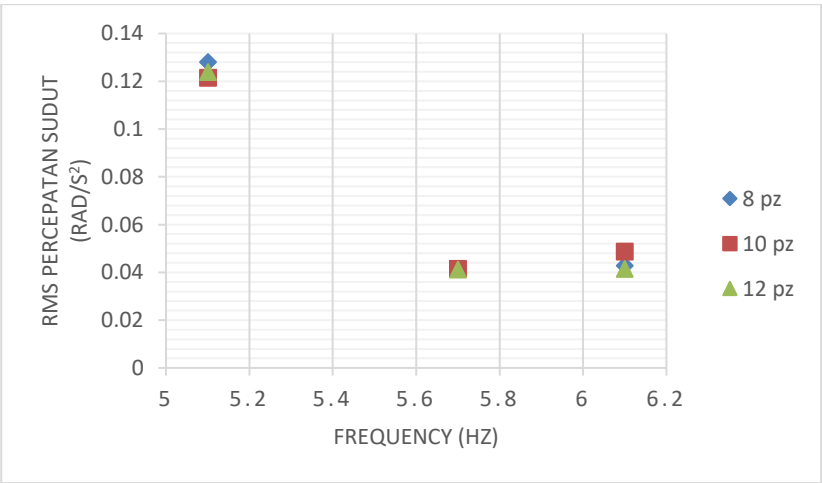
Pada gambar grafik 4.19 (c) terlihat bahwa nilai Energi listrik bangkitan yang terbesar berada di frekuensi operasi sistem atau di 5,7 hz hal ini dikarenakan reduksi dari getaran yang terjadi di frekuensi operasi paling besar dan mengakibatkan nilai depleksi dari *piezoelectric* besar.

4.5.2.2. Analisa Mekanisme Sistem Massa Utama dengan CPVA Pada Jarak $b_2 = 10$ cm

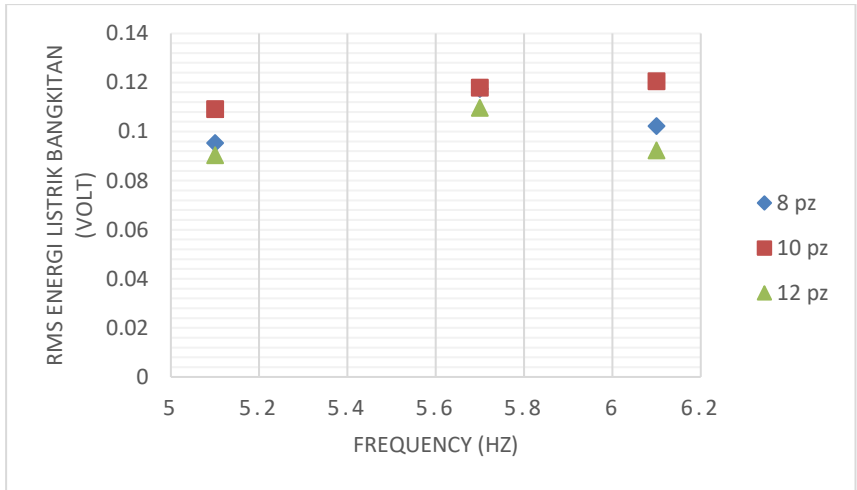
Hasil Respon getaran untuk jarak penempatan CPVA $b_2 = 10$ cm dari titik pusat massa utama berikut hasil RMS yang telah digrafikan pada gambar 4.20:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.20 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan Energi listrik bangkitan dengan peletakan CPVA 10 cm

Gambar grafik 4.20 (a) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,1186 \text{ m/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi 5,7 hz nilai RMS semakin menurun dengan nilai $0,0752 \text{ m/s}^2$, dan pada inputan frekuensi 6,1 hz nilai RMS kembali naik dengan nilai $0,0761 \text{ m/s}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak translasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5,7 hz atau pada frekuensi operasinya. Untuk nilai RMS pada Piezoelectric 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

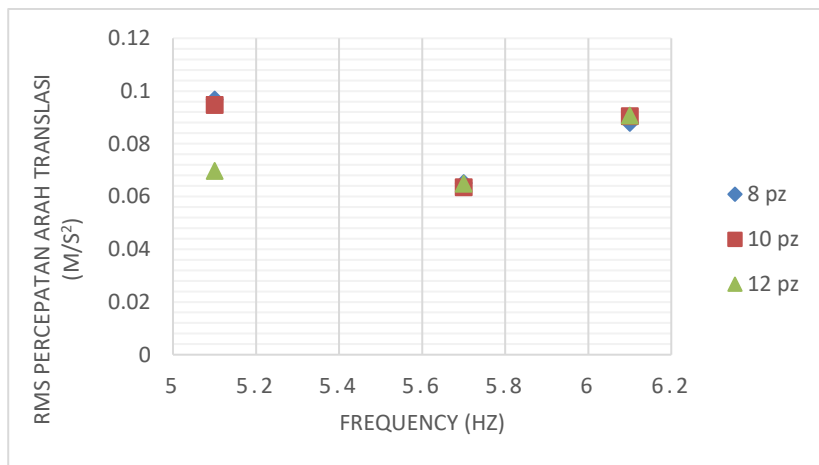
Pada Gambar grafik 4.20 (b) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,12806 \text{ rad/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi nilai RMS semakin menurun dengan

nilai $0,0415 \text{ rad/s}^2$, dan pada inputan frekuensi $6,1 \text{ Hz}$ nilai RMS kembali turun dengan nilai $0,042733 \text{ rad/s}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak rotasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi $5,7 \text{ Hz}$. Untuk nilai RMS pada Piezoelektrik 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

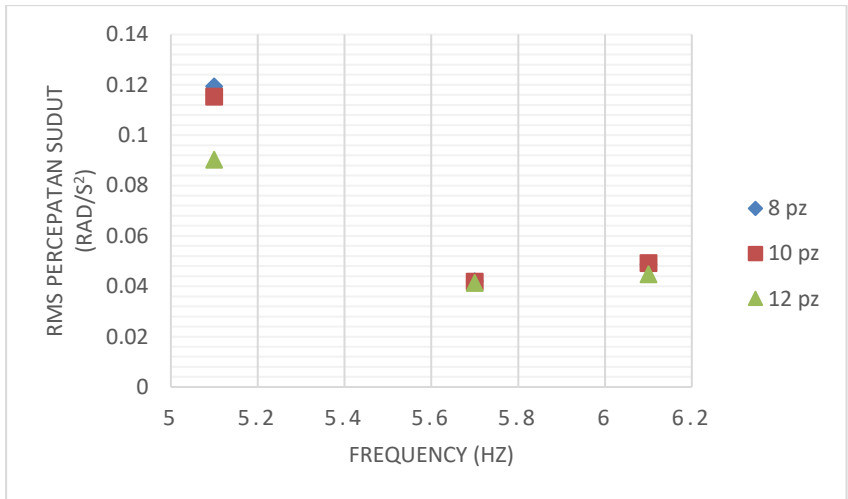
Pada gambar grafik 4.20 (c) terlihat bahwa nilai energi listrik bangkitan yang terbesar berada di frekuensi operasi sistem atau di $5,7 \text{ Hz}$ hal ini dikarenakan redaman dari getaran yang terjadi di frekuensi operasi paling besar dan mengakibatkan nilai depleksi dari *piezoelectric* besar. Semakin sedikit jumlah *piezoelectric* energi bangkitan juga akan semakin besar.

4.5.2.3. Analisa Mekanisme Sistem Massa Utama dengan CPVA Pada Jarak $b_3 = 20 \text{ cm}$

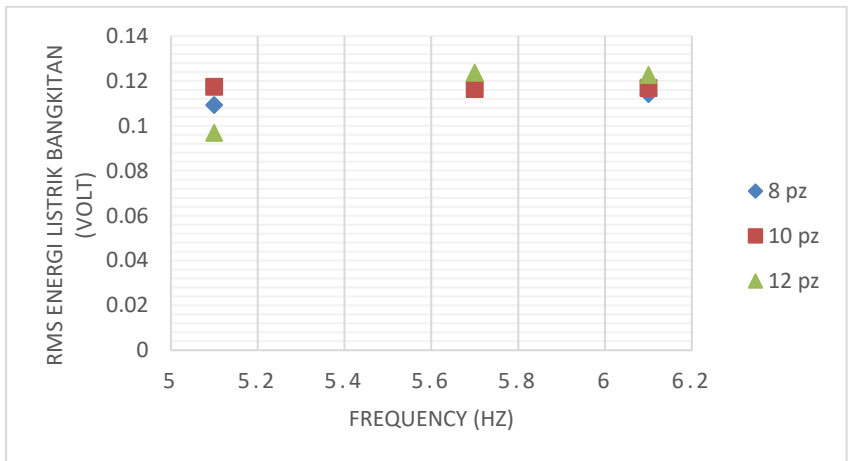
Hasil Respon getaran untuk jarak penempatan CPVA $b_3 = 20 \text{ cm}$ dari titik pusat massa utama berikut hasil RMS yang telah digrafikan pada gambar 4.21:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.21 Akibat pengaruh variasi input frekuensi dan Energi listrik bangkitan dengan pletakan CPVA 20 cm

Gambar grafik 4.21 (a) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,0967 \text{ m/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi 5,7 hz nilai RMS semakin menurun dengan nilai $0,0651 \text{ m/s}^2$, dan pada inputan frekuensi 6.1 hz nilai RMS kembali naik dengan nilai $0,0879 \text{ m/s}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak translasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5,7 hz atau pada frekuensi operasinya. Untuk nilai RMS pada Piezoelektrik 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

Pada Gambar grafik 4.21 (b) terlihat bahwa nilai redaman pada input frekuensi 5,1 hz dengan *piezoelectric* 8 buah didapatkan nilai RMS sebesar $0,1194 \text{ rad/s}^2$. ketika pada inputan frekuensi operasi nilai RMS semakin menurun dengan nilai $0,0418767 \text{ rad/s}^2$, dan pada inputan frekuensi 6,1 hz nilai RMS kembali turun dengan nilai $0,04867 \text{ rad/s}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak rotasi hasil simulasi didapatkan nilai redaman yang terbaik pada frekuensi 5,7 hz. Untuk nilai RMS pada Piezoelektrik 10 buah dan 12 buah tidak terlalu berbeda dengan nilai RMS pada jumlah *piezoelectric* 8 buah.

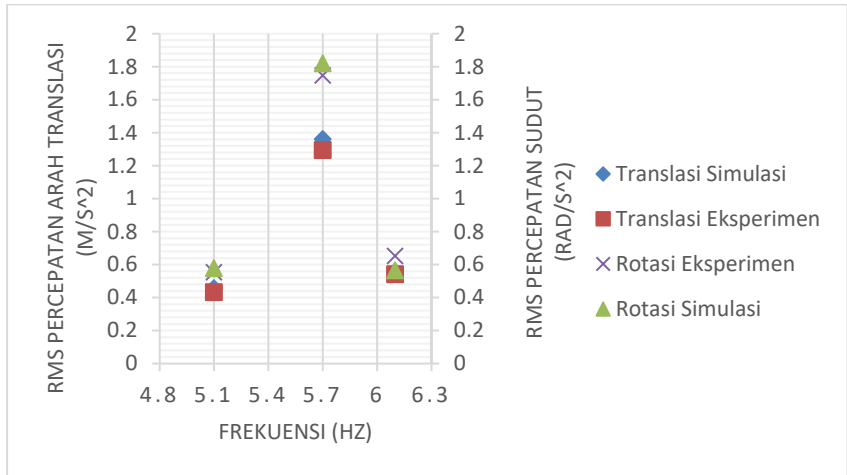
Pada gambar grafik 4.21 (c) terlihat bahwa nilai Energi listrik bangkitan yang terbesar berada di frekuensi operasi sistem atau di 5,7 hz hal ini dikarenakan redaman dari getaran yang terjadi di frekuensi operasi paling besar dan mengakibatkan nilai defleksi dari *piezoelectric* besar. Semakin sedikit jumlah *piezoelectric* energi bangkitan juga akan semakin besar.

4.6. Validasi Hasil Simulasi dan Eksperimen

4.6.1. Pembahasan Hasil Simulasi dan Eksperimen tanpa CPVA

Dari perolehan data hasil simulasi dan eksperimen, perlu dilakukan Analisa lebih lanjut untuk mengetahui apakah hasil dari eksperimen menggambarkan kondisi ideal (simulasi). Dari hasil

simulasi dan eksperimen didapatkan hasil perbandingan antara simulasi dan eksperimen tanpa CPVA sebagai berikut:



Gambar 4.22 Hasil Respon Percepatan Sistem massa utama tanpa CPVA

Pada gambar 4.22 diatas menunjukkan nilai RMS respon percepatan massa utama. Terlihat bahwa nilai RMS pada variasi frekuensi yang diberikan mempunyai nilai yang mendekati antara hasil dari simulasi dan eksperimen. Trend dari hasil RMS respon percepatan sistem massa utama tanpa CPVA pada simulasi dan eksperimen mempunyai trend yang sama. Nilai RMS yang terbesar dihasilkan oleh frekuensi 5,7 hz, nilai RMS yang lebih besar pada frekuensi 5,7 hz menunjukkan bahwa ketika gaya eksitasi mendekati frekuensi natural sistem maka nilai dari RMS percepatan arah translasi dan rotasi akan semakin besar. Hasil respon percepatan arah translasi dan rotasi pada frekuensi natural sistem atau 5,7 hz pada sistem massa utama simulasi dan eksperimen untuk arah translasi didapatkan nilai RMS sebesar 1.3602 m/s^2 dan hasil untuk eksperimen sebesar 1.2944 m/s^2 .

Sementara untuk hasil arah rotasi hasil simulasi didapatkan nilai RMS sebesar 1.8215 rad/s^2 dan untuk hasil eksperimen didapatkan nilai RMS sebesar 1.7474 rad/s^2 . Sementara untuk variasi frekuensi 5,1 hz didapatkan nilai percepatan RMS arah translasi dari simulasi 0.456 m/s^2 dan eksperimen $0,4332 \text{ m/s}^2$. Untuk nilai RMS percepatan arah rotasi sistem massa utam simulasi didapatkan nilai 0.579 rad/s^2 dan $0,529 \text{ rad/s}^2$. Pada variasi frekuensi 6,1 hz didapatkan nilai RMS respon percepatan arah translasi pada simulasi sebesar $0,558 \text{ m/s}^2$ dan 0.534 m/s^2 untuk hasil eksperimen. Sementara untuk hasil respon percepatan arah rotasi didapatkan nilai RMS pada simulasi sebesar 0.686 rad/s^2 dan 0.652 rad/s^2 untuk hasil eksperimen.

Dari Analisa nilai RMS respon percepatan translasi dan rotasi sistem massa utama antara simulasi dan eksperimen dapat dicari nilai eror. Contoh untuk memperoleh eror pada frekuensi 5,7 hz sebagai berikut:

$$\frac{1.2944 \text{ m/s}^2}{1.3602 \text{ m/s}^2} * 100 = 95,16\%$$

Maka eror yang didapat yaitu $100\% - 95,16\% = 4.84\%$

Tabel 4.11 Eror hasil simulasi dan eksperimen tanpa CPVA

Frekuensi (Hz)	Simulasi (translasi) (m/s^2)	Eksperimen (translasi) (m/s^2)	Akurasi %	Eror (%)
5.1	0.456	0.4332	95	5
5.7	1.3602	1.2944	95.1625	4.8
6.1	0.558	0.534	95.6989	4.3

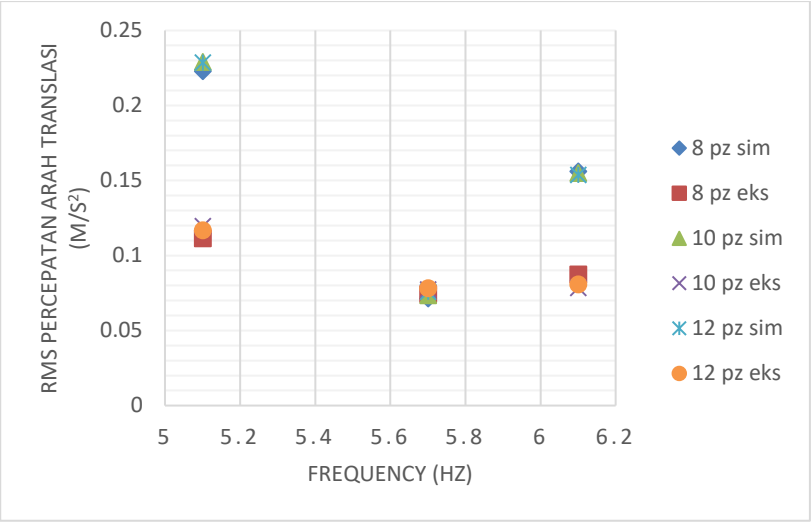
Frekuensi (Hz)	Simulasi (Rotasi) (Rad/s ²)	Eksperimen (Rotasi) (Rad/s ²)	Akurasi %	Eror (%)
5.1	0.579	0.5529	95.4922	4.50777
5.7	1.8215	1.7474	95.9319	4.06808
6.1	0.686	0.652	95.0437	4.95627

Dari table 4.11 menunjukan eror dari semua variasi frekuensi menunjukan dibawah 5%, maka permodelan yang dibangun sudah sesuai dengan hasil eksperimen. Dan hasilnya valid untuk sistem massa utama tanpa CPVA.

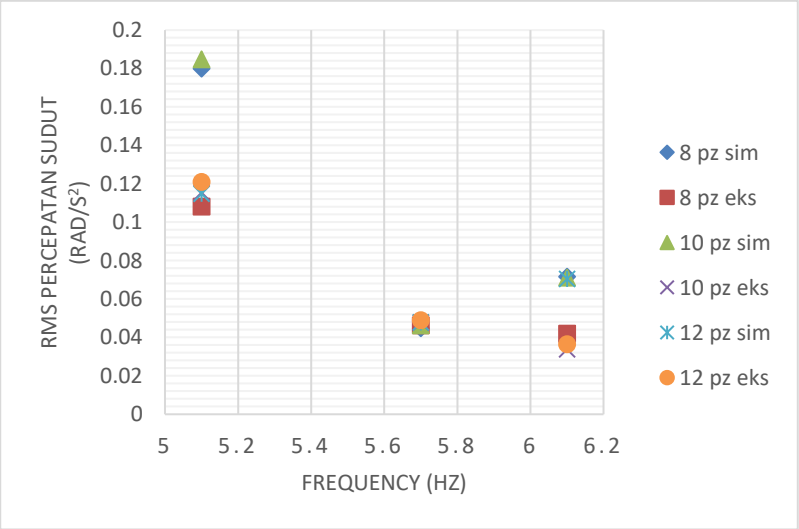
4.6.2. Pembahasan Hasil Simulasi dan Eksperimen dengan CPVA

4.6.2.1. Analisa Hasil Simulasi dan Eksperimen dengan CPVA pada jarak $b_1 = 0$ cm

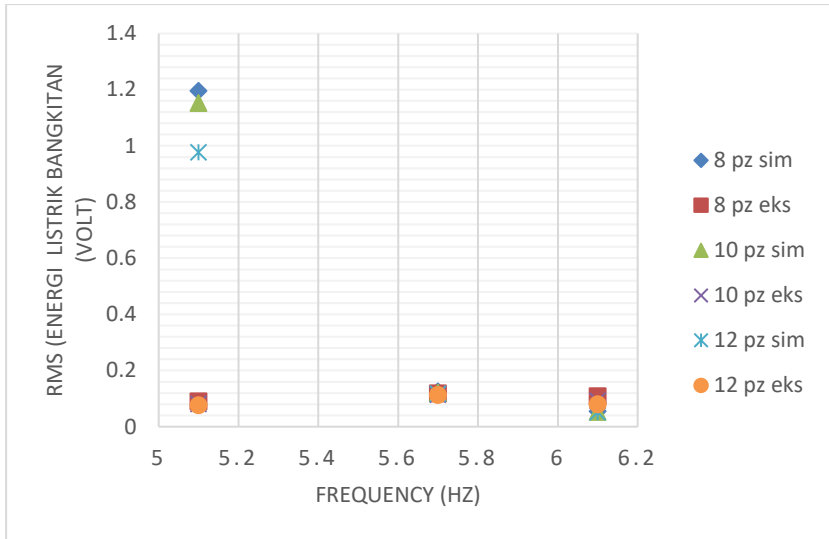
Hasil respon percepatan massa utama dan energi listrik bangkitan yang didapat dari simulasi dan eksperimen setelah ditambahkan CPVA pada jarak 0 cm dari titik pusat massa utama seperti pada tabel 4.11 berikut:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.23 Perbandingan respon percepatan dan Energi listrik bangkitan antara simulasi dan eksperimen

Dari gambar 4.23 (a) nilai RMS arah translasi hasil respon percepatan dari semua inputan frekuensi cenderung menurun dari 5.1 hz ke 5.7 hz dan kembali naik kembali di frekuensi 6.1 hz. Nilai RMS antara simulasi dan eksperimen di frekuensi 5.1 hz terlihat mempunyai perbedaan yang cukup besar pada jumlah *piezoelectric* 8 dengan nilai 0.2228 m/s^2 untuk simulasi dan 0.1114 m/s^2 . Hal tersebut terjadi pula pada nilai RMS di frekuensi 6.1 hz dengan jumlah *piezoelectric* 8 buah yaitu sebesar 0.1561 m/s^2 untuk simulasi dan 0.08773 m/s^2 untuk hasil eksperimen. Untuk nilai RMS gerak translasi pada 5.7 hz nilai respon percepatan antara hasil simulasi dan eksperimen cenderung mempunyai nilai yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa untuk gerak translasi di frekuensi natural sistem 5.7 hz mempunyai kesamaan nilai antara simulasi dan eksperimen. Pada *trendline*

yang ditujukan respon dari respon gerak translasi mempunyai kesamaan antara hasil simulasi dan eksperimen. Sementara untuk variasi frekuensi 5.1 hz (b), *trendline* mengalami penurunan nilai RMS pada 5,7 hz dan kembali meningkat pada 6.1 hz untuk hasil simulasi maupun eksperimen. Energi listrik bangkitan (c) mempunyai *trendline* yang naik pada frekuensi 5,7 hz dan turun kembali pada frekuensi 6,1. Hal ini dikarenakan pada frekuensi operasi getaran yang terjadi cukup besar dan mengakibatkan defleksi pada *piezoelectric* semakin besar pula.

Eror yang terjadi pada nilai RMS respon gerak translasi pada 5.7 hz pada jumlah *piezoelectric* 8 buah sebesar:

$$\frac{0.0713 \text{ m/s}^2}{0.0743 \text{ m/s}^2} * 100 = 95,96\%$$

Maka eror yang didapat yaitu $100\% - 95,96\% = 4.04\%$

Contoh data reduksi getaran di frekuensi 5,7 hz seperti pada tabel 4.12 sebagai berikut:

Tabel 4.12 Perbandingan hasil simulasi dan ekperimen pada frekuensi 5,7 hz pada peletakan CPVA 0 cm

Respon	Frekuensi (Hz)	8 pz		10 pz		12 pz		Akurasi (%)		
		sim	eks	sim	eks	sim	eks	8	10	12
m/s ²	5.7	0.071	0.074	0.07	0.077	0.08	0.078	95.96	95.2	95.17
rad/s ²	5.7	0.045	0.046	0.05	0.048	0.05	0.049	96.68	96.8	97.79

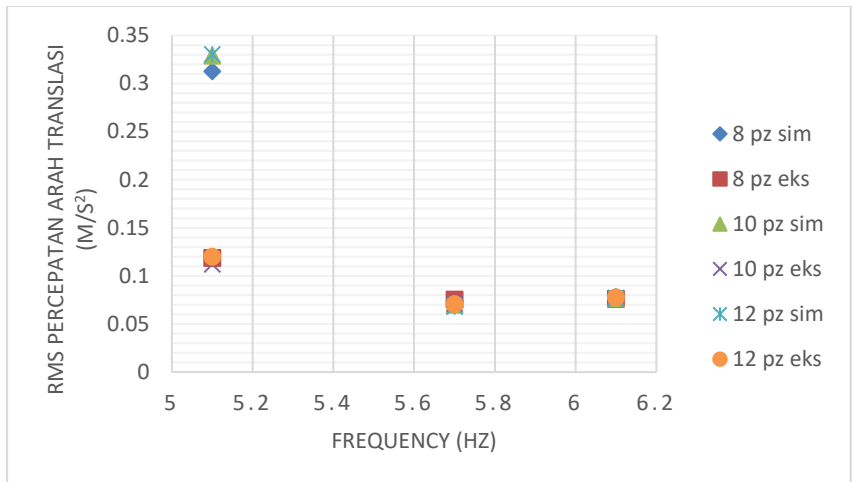
Data terlampir untuk nilai akurasi lebih lanjut pada frekuensi 5,1 hz, 5,7 hz, dan 6,1 hz dengan jumlah *piezoelectric* 8, 10, dan 12 buah pada peletakan CPVA 0 cm.

Pada frekuensi 5,1 hz dan 6,1 hz mempunyai nilai eror lebih dari 5% antara simulasi dan eksperimen hal ini dikarenakan faktor dari nilai konstanta pegas dan redaman dari material

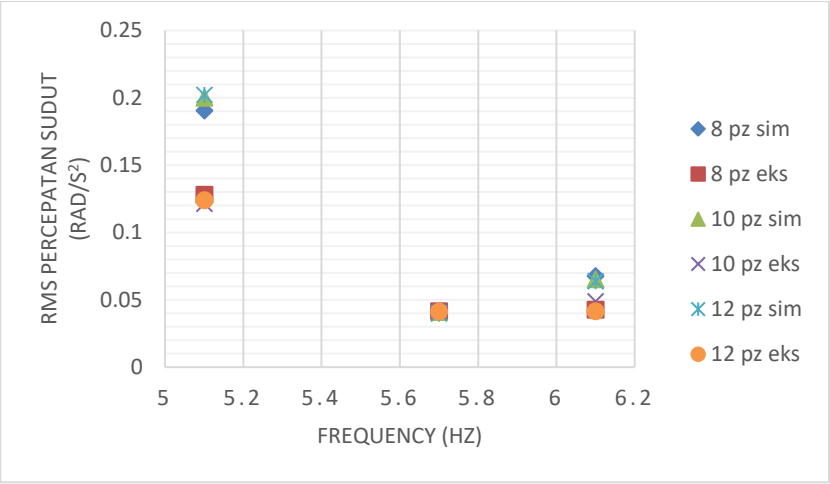
piezoelectric yang belum mempunyai nilai yang valid pada hasil eksperimen. Nilai dari konstanta pegas maupun redaman material piezoelectric didapatkan dari pengukuran langsung oleh peneliti seperti pada subbab 4.2.2 Hal ini mempengaruhi baik nilai dari simulasi maupun eksperimen.

4.6.2.2. Analisa Hasil Simulasi dan Eksperimen dengan CPVA pada jarak b_2

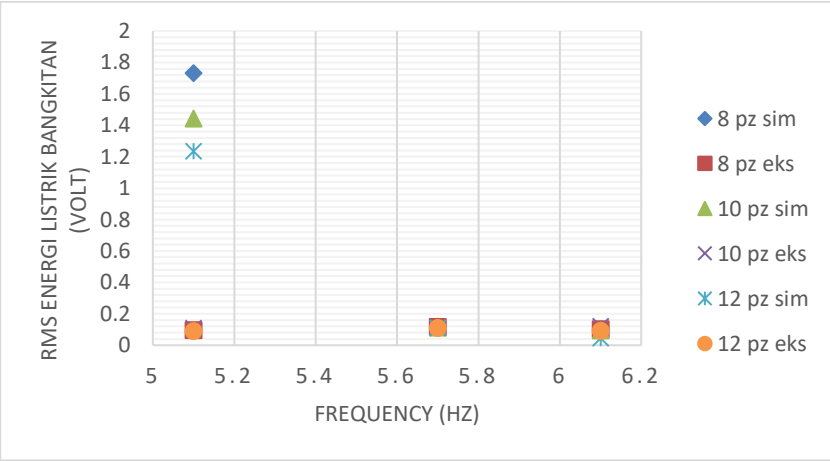
Hasil respon getaran yang didapat dari simulasi dan eksperimen setelah ditambahkan CPVA pada jarak 10 cm dari titik pusat massa utama sebagai berikut:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan

Gambar 4.24 Perbandingan respon percepatan dan Energi listrik bangkitan antara simulasi dan eksperimen

Dari gambar 4.24 (a), (b) data respon percepatan yang didapatkan terlihat bahwa *trendline* turun pada 5,7 hz, sementara untuk energi listrik bangkitan terbesar didapatkan pada frekuensi 5,7 hz hal ini diakibatkan oleh redamn yang semakin baik maka nilai defleksi dari *piezoelectric* juga semakin besar. Dari grafik di atas maka data ditabelkan sebagai berikut:

Contoh data reduksi getaran di frekuensi 5,7 hz seperti pada tabel 4.13 sebagai berikut:

Tabel 4.13 Perbandingan hasil simulasi dan ekperimen pada frekuensi 5,7 hz pada peletakan CPVA 10 cm

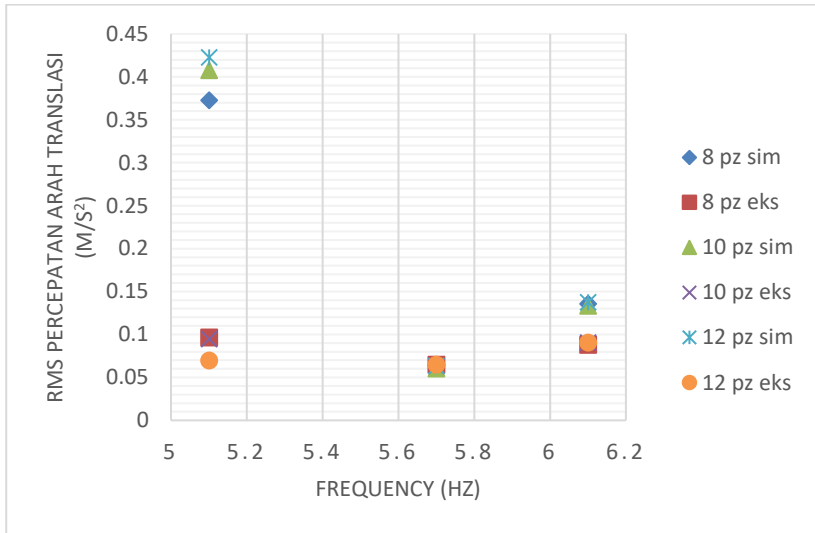
respon	frekuensi (Hz)	8 pz		10 pz		12 pz		Reduksi (%)		
		sim	eks	sim	eks	sim	eks	8	10	12
m/s ²	5.7	0.074	0.075	0.07	0.071	0.07	0.071	97.87	98.1	96.23
rad/s ²	5.7	0.041	0.042	0.04	0.041	0.04	0.041	97.59	99	96.6

Data terlampir untuk nilai eror lebih lanjut pada frekuensi 5,1 hz, 5,7 hz, dan 6,1 hz dengan jumlah *piezoelectric* 8, 10, dan 12 buah pada peletakan CPVA 10 cm.

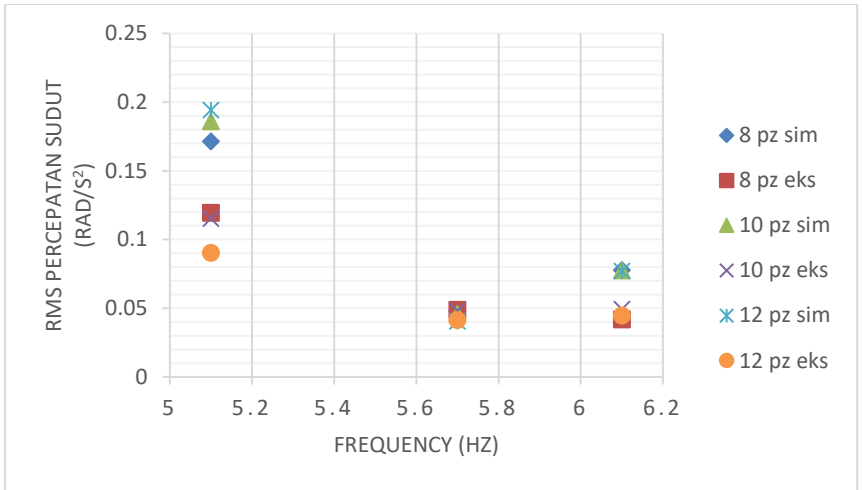
Pada frekuensi 5,1 hz dan 6,1 hz mempunyai nilai eror lebih dari 5% antara simulasi dan eksperimen hal ini dikarenakan faktor dari nilai konstanta pegas dan redaman dari material *piezoelectric* yang belum mempunyai nilai yang valid pada hasil eksperimen. Nilai dari konstanta pegas maupun redaman material *piezoelectric* didapatkan dari pengukuran langsung oleh peneliti seperti pada subbab 4.2.2 Hal ini mempengaruhi baik nilai dari simulasi maupun eksperimen.

4.6.2.3. Analisa Hasil Simulasi dan Eksperimen dengan CPVA pada jarak $b_3 = 20$ cm

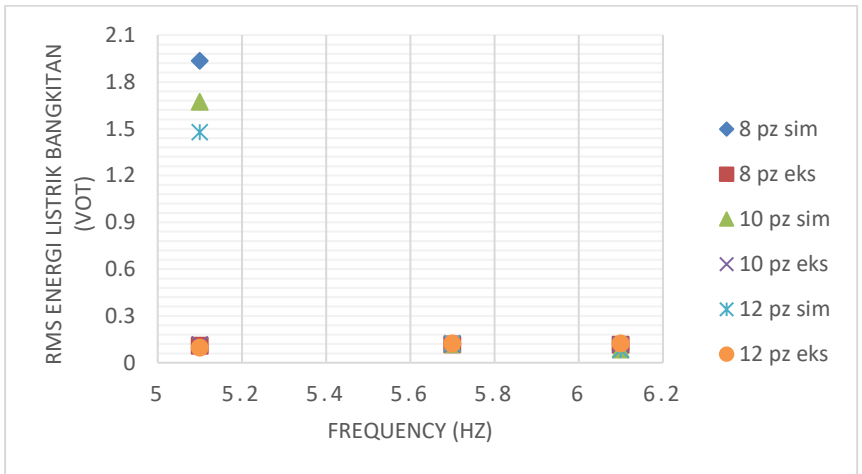
Hasil respon getaran yang didapat dari simulasi dan eksperimen setelah ditambahkan CPVA pada jarak 20 cm dari titik pusat massa utama sebagai berikut:



(a) Translasi



(b) Rotasi



(c) Energi listrik bangkitan (volt)

Gambar 4.25 Perbandingan respon percepatan dan energi listrik bangkitan antara simulasi dan eksperimen

Dari gambar 4.25 (a), (b) data respon percepatan yang didapatkan terlihat bahwa *trendline* turun pada 5,7 hz, sementara untuk energi listrik bangkitan (volt) terbesar didapatkan pada frekuensi 5,7 hz hal ini diakibatkan oleh redaman yang semakin baik maka nilai defleksi dari *piezoelectric* juga semakin besar. Dari grafik di atas maka data ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 4.14 Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen pada frekuensi 5,7 hz pada peletakan CPVA 20 cm

Respon	Frekuensi (Hz)	8 pz		10 pz		12 pz		Reduksi (%)		
		sim	eks	sim	eks	sim	eks	8	10	12
m/s ²	5.7	0.064	0.065	0.06	0.064	0.06	0.065	98.62	95.2	97.74
rad/s ²	5.7	0.048	0.049	0.05	0.048	0.04	0.041	98.02	95.1	97.9

Pada table 4.14 berikut merupakan nilai perbandingan antara hasil dari simulasi dan eksperimen, yang hanya ditampilkan pada frekuensi natural atau 5,7 hz karena mempunyai nilai eror kurang dari 5%.

Data terlampir untuk nilai eror pada frekuensi 5,1 hz, 5,7 hz, dan 6,1 hz dengan jumlah *piezoelectric* 8, 10, dan 12 buah pada peletakan CPVA 20 cm.

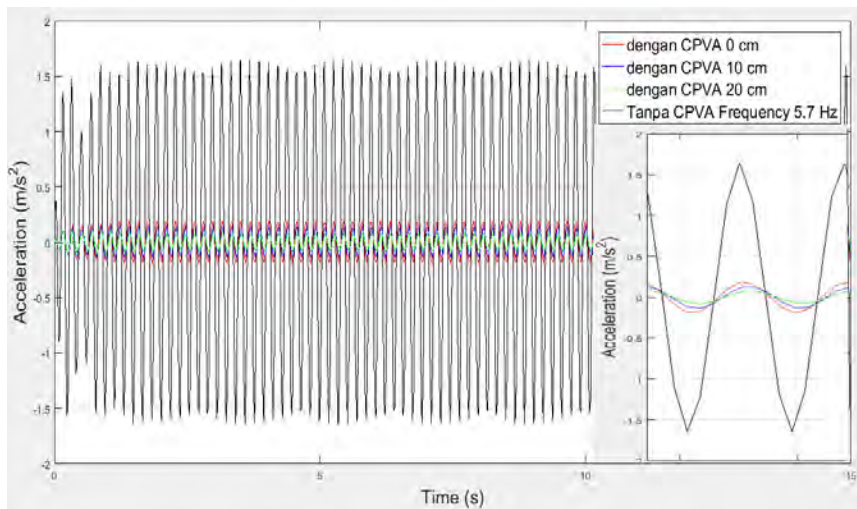
Pada frekuensi 5,1 hz dan 6,1 hz mempunyai nilai eror lebih dari 5% antara simulasi dan eksperimen hal ini dikarenakan faktor dari nilai konstanta pegas dan redaman dari material *piezoelectric* yang belum mempunyai nilai yang valid pada hasil eksperimen. Nilai dari konstanta pegas maupun redaman material *piezoelectric* didapatkan dari pengukuran langsung oleh peneliti seperti pada subbab 4.2.2 Hal ini mempengaruhi baik nilai dari simulasi maupun eksperimen.

4.6.3. Validasi Reduksi dan Energi Listrik Bangkitan (volt) Pada Frekuensi 5,7 Hz

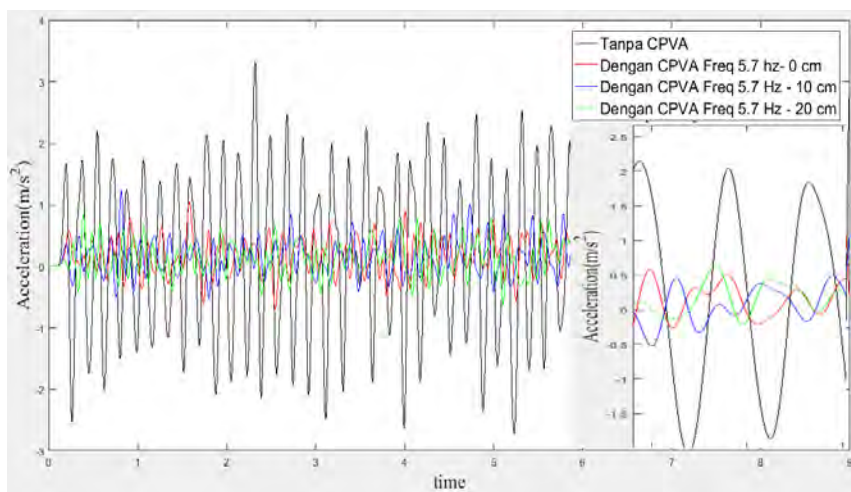
Pada subbab 4.6.2 diperoleh akurasi data pada variasi frekuensi 5,1 Hz, 5,7 Hz, dan 6,1 Hz terhadap peletakan CPVA 0 cm, 10 cm, dan 20 cm dari titik pusat massa utama antara hasil simulasi dan eksperimen. dari pembahasan tersebut diketahui akurasi data yang memenuhi persyaratan dibawah 5% hanya pada frekuensi natural sistem atau 5,7 Hz. Untuk frekuensi 5,1 Hz dan 6,1 Hz tidak memenuhi persyaratan untuk validasi reduksi dan energi listrik bangkitan (volt). Hal ini diakibatkan karena faktor dari nilai konstanta pegas dan redaman dari material piezoelectric yang belum mempunyai nilai yang valid pada hasil eksperimen. Hal ini mempengaruhi baik nilai dari simulasi maupun eksperimen, meskipun untuk *trendline* pada semua variasi frekuensi dan variasi jarak peletakan CPVA mempunyai *trendline* yang sama antara hasil dari simulasi dan eksperimen. Berikut pembahasan yang dikhususkan pada frekuensi natural sistem 5,7 Hz karena memenuhi persyaratan eror dibawah 5%:

4.6.3.1. Pembahasan Reduksi Getaran Arah Translasi Pada Frekuensi 5,7 Hz Terhadap Peletakan Jarak CPVA

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian secara langsung pada alat simulator getaran tanpa CPVA dan data pengujian dengan penambahan CPVA, dibuat analisa redaman untuk mengetahui seberapa besar getaran yang mampu diredam oleh mekanisme CPVA. Besarnya redaman dinyatakan dalam satuan persen (%) dengan cara membandingkan respon sistem saat dioperasikan tanpa CPVA dengan respon sistem saat dioperasikan dengan penambahan CPVA. Berikut data pengaruh reduksi getaran arah translasi terhadap jarak peletakan dari CPVA:



(a) Simulasi



(b) Eksperimen

Gambar 4.26 Pengaruh peletakan CPVA terhadap reduksi getaran arah translasi

Pada respon percepatan arah translasi pada frekuensi 5,7 hz seperti pada gambar 4.26, untuk respon ketika tanpa CPVA digambarkan oleh warna hitam, untuk respon percepatan dengan CPVA dengan frekuensi 5,7 hz untuk jarak peletakan CPVA 0 cm dari titik pusat massa utama di gambarkan oleh warna merah, 10 cm warna biru dan 20 cm digambarkan oleh warna hijau. Dari redaman yang terlihat pada hasil simulasi maupun dari eksperimen untuk pengaruh nilai redaman terhadap pengaruh peletakan CPVA mempunyai nilai yang mirip. Dari analisa respon percepatan arah translasi hasil simulasi dan eksperimen didapatkan respon seperti pada tabel 4.15 dan 4.16:

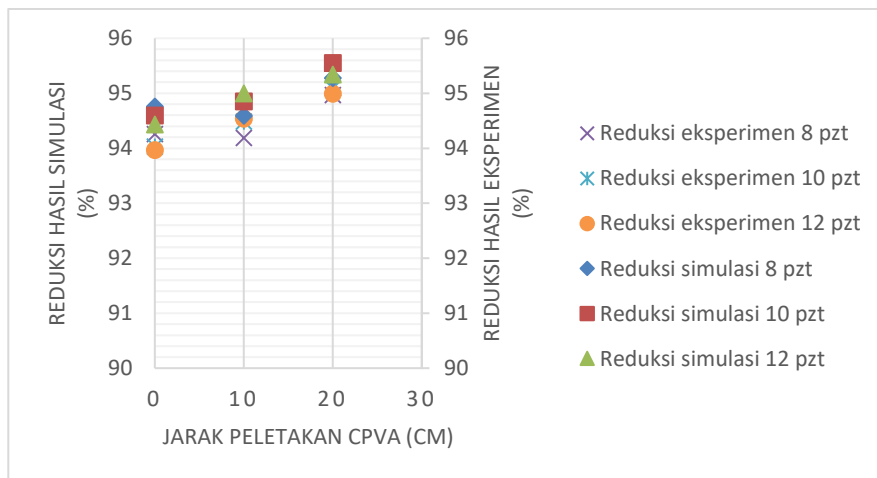
4.15 Reduksi Percepatan Translasi hasil simulasi

Jarak CPVA (cm)	Tanpa CPVA Translasi (m/s^2)	Dengan CPVA Tranlasi (m/s^2)			Reduksi (%)		
		8 pzt	10 pzt	12 pzt	8 pzt	10 pzt	12 pzt
0	1.36	0.071	0.074	0.076	94.76	94.6	94.4
10	1.36	0.074	0.07	0.068	94.59	94.9	95
20	1.36	0.064	0.061	0.063	95.28	95.6	95.3

4.16 Reduksi Percepatan Translasi hasil eksperimen

Jarak CPVA (cm)	Tanpa CPVA Translasi (m/s^2)	Dengan CPVA Translasi (m/s^2)			Reduksi (%)		
		8 pzt	10 pzt	12 pzt	8 pzt	10 pzt	12 pzt
0	1.294	0.074	0.077	0.078	94.26	94	94
10	1.294	0.075	0.071	0.071	94.19	94.5	94.5
20	1.294	0.065	0.064	0.065	94.97	95.1	95

Dari nilai-nilai redaman diatas, maka digrafikan sebagai berikut:



Gambar 4.27 Pengaruh penempatan CPVA terhadap reduksi getaran arah translasi

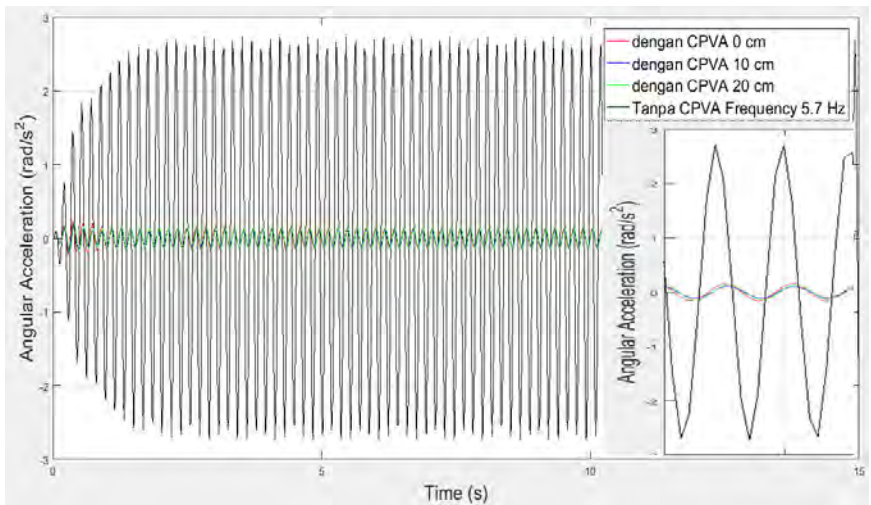
Dari gambar 4.27 terlihat bahwa untuk percepatan arah translasi semakin jauh peletakan CPVA dari massa utama maka nilai redaman akan semakin besar. Redaman terbaik untuk percepatan arah translasi didapatkan di jarak peletakan CPVA pada jarak 20 cm dari titik pusat massa utama. Untuk hasil antara simulasi dan eksperimen mempunyai nilai redaman yang sama. Sebagai contoh: untuk hasil simulasi pada jarak 0 cm didapatkan nilai reduksi 94,76% dan untuk eksperimen nilai reduksi sebesar 94,26%. Dari kedua hasil reduksi tersebut didapatkan hasil validasi sebesar:

$$\frac{94,26\%}{94,76\%} \times 100\% = 99,47\%$$

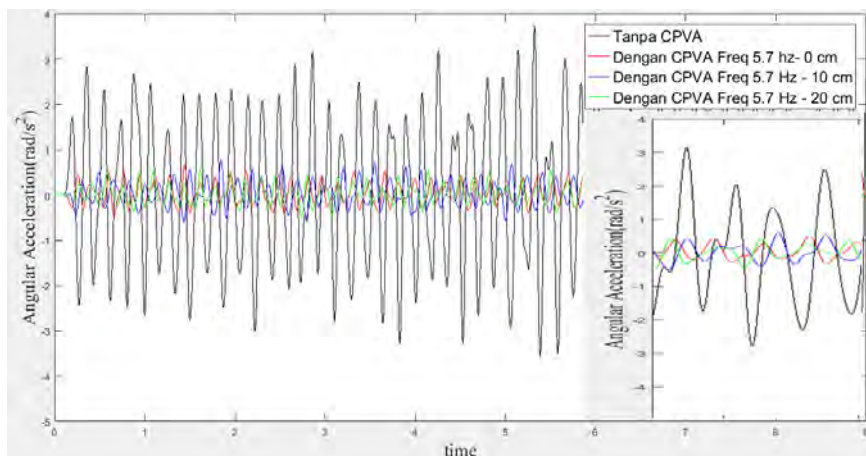
Nilai reduksi yang mempunyai eror kurang dari 5% antara hasil simulasi dan eksperimen, hal ini menunjukkan bahwa percepatan arah translasi dinyatakan valid.

4.6.3.2. Pembahasan Reduksi Getaran Arah Rotasi Pada Frekuensi 5,7 hz Terhadap Peletakan Jarak CPVA

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian secara langsung pada alat simulator getaran tanpa CPVA dan data pengujian dengan penambahan CPVA, dibuat analisa redaman untuk mengetahui seberapa besar getaran yang mampu diredam oleh mekanisme CPVA. Besarnya redaman dinyatakan dalam satuan persen (%) dengan cara membandingkan respon sistem saat dioperasikan tanpa CPVA dengan respon sistem saat dioperasikan dengan penambahan CPVA. Berikut data pengaruh reduksi getaran arah rotasi terhadap jarak peletakan dari CPVA:



(a) Simulasi



(b) Eksperimen

Gambar 4.28 Pengaruh peletakan CPVA terhadap reduksi getaran arah rotasi

Pada respon percepatan arah rotasi pada frekuensi 5,7 hz seperti pada gambar 4.28, untuk respon ketika tanpa CPVA digambarkan oleh warna hitam, untuk respon percepatan dengan CPVA dengan frekuensi 5,7 hz untuk jarak peletakan CPVA 0 cm dari titik pusat massa utama di gambarkan oleh warna merah, 10 cm warna biru dan 20 cm digambarkan oleh warna hijau. Dari redaman yang terlihat pada hasil simulasi maupun dari eksperimen untuk pengaruh nilai redaman terhadap pengaruh peletakan CPVA mempunyai nilai yang mirip. Dari analisa respon percepatan arah translasi hasil simulasi dan eksperimen didapatkan respon seperti pada tabel 4.17 dan 4.18:

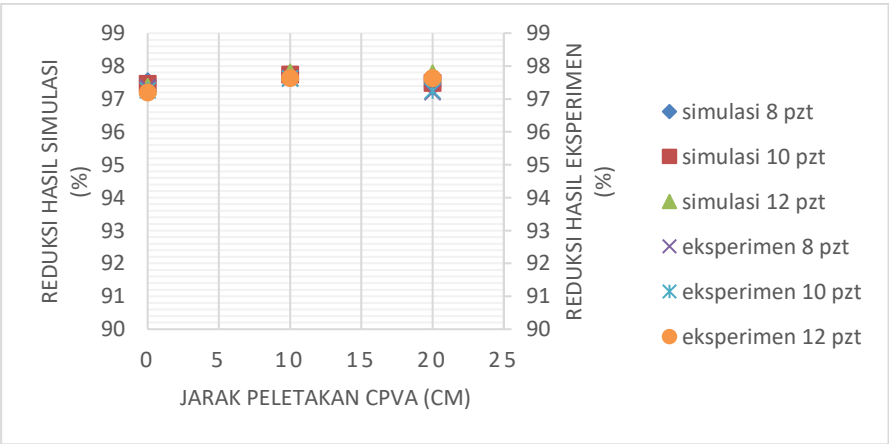
Tabel 4.17 Reduksi Percepatan rotasi hasil simulasi

Jarak (cm)	Tanpa CPVA Rotasi (rad/s ²)	Dengan CPVA Rotasi (rad/s ²)			Reduksi (%)		
		8 pzt	10 pzt	12 pzt	8 pzt	10 pzt	12 pzt
0	1.8215	0.0447	0.0462	0.0478	97.546	97.464	97.38
10	1.8215	0.0405	0.041	0.0398	97.777	97.749	97.81
20	1.8215	0.0478	0.0457	0.0404	97.376	97.491	97.78

Tabel 4.18 Reduksi Percepatan rotasi hasil eksperimen

Jarak (cm)	Tanpa CPVA Rotasi (rad/s ²)	Dengan CPVA Rotasi (rad/s ²)			Reduksi (%)		
		8 pzt	10 pzt	12 pzt	8 pzt	10 pzt	12 pzt
0	1.7474	0.0462	0.0477	0.0489	97.354	97.268	97.2
10	1.7474	0.0415	0.0414	0.0412	97.625	97.629	97.64
20	1.7474	0.0488	0.048	0.0413	97.209	97.251	97.64

Dari nilai-nilai redaman diatas, maka digrafikan sebagai berikut:



Gambar 4.29 Pengaruh penempatan CPVA terhadap reduksi getaran arah rotasi

Dari grafik pada gambar 4.29 terlihat bahwa nilai reduksi getaran antara simulasi dan eksperimen mempunyai nilai yang hampir sama. Nilai redaman tertinggi terlihat bahwa pada jarak 10 cm mampu mereduksi getaran paling baik antara penempatan CPVA pada jarak 0 cm dan 20 cm. Untuk hasil antara simulasi dan eksperimen mempunyai nilai redaman yang sama. Sebagai contoh: untuk hasil simulasi pada jarak 0 cm didapatkan nilai reduksi 97,55% dan untuk eksperimen nilai reduksi sebesar 97,35%. Dari kedua hasil reduksi tersebut didapatkan hasil validasi sebesar:

$$\frac{97,35\%}{97,55\%} \times 100\% = 99,79\%$$

Nilai reduksi yang mempunyai eror kurang dari 5% antara hasil simulasi dan eksperimen, hal ini menunjukkan bahwa percepatan arah rotasi dinyatakan valid.

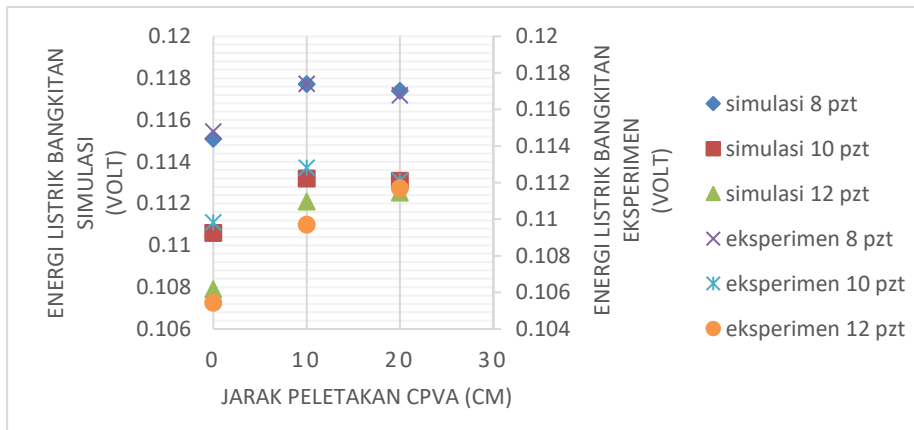
4.6.3.3. Pembahasan Energi Listrik Bangkitan (volt) Pada Frekuensi 5,7 hz Terhadap Peletakan Jarak CPVA

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh hubungan antara data redaman yang terjadi pada sistem utama dengan besarnya voltase energi listrik yang dihasilkan oleh mekanisme CPVA, dimana hubungan tersebut ditampilkan oleh data pada tabel 4.19 berikut:

Tabel 4.19 hubungan peletakan CPVA terhadap energi listrik bangkitan

Jarak (cm)	Simulasi (volt)			Eksperimen (volt)		
	8 pzt	10 pzt	12 pzt	8 pzt	10 pzt	12 pzt
0	0.1151	0.1106	0.1079	0.1148	0.1098	0.1054
10	0.1177	0.1132	0.1121	0.1174	0.1128	0.1097
20	0.1174	0.1131	0.1125	0.1168	0.1121	0.1117

Dari nilai-nilai redaman diatas, maka digrafikan sebagai berikut:



Gambar 4.30 Pengaruh peletakan CPVA terhadap energi listrik bangkitan

Dari gambar 4.30 untuk hasil simulasi dan eksperimen terlihat bahwa untuk jarak penempatan CPVA 0 cm dari titik pusat massa utama ketika jumlah *piezoelectric* semakin sedikit maka nilai energi listrik yang dibangkitkan akan semakin besar, dan hal tersebut juga terjadi pada jarak 10 cm dan 20 cm. energi listrik bangkitan yang terbesar didapatkan pada jarak 10 cm dengan jumlah *piezoelectric* 8 buah 0,1177 volt untuk hasil

simulasi dan 0.1174 volt untuk hasil eksperimen. Energi listrik yang terbesar didapatkan pada jarak 10 cm dari titik pusat massa utama dikarenakan reduksi untuk arah rotasi terjadi pada jarak 10 cm mempengaruhi nilai dari energi listrik yang dapat dibangkitkan, defleksi yang besar pada *piezoelectric* yang diakibatkan oleh getaran membuat energi listrik bangkitan juga meningkat. Dari kedua hasil energi listrik bangkitan tersebut didapatkan hasil validasi sebesar:

$$\frac{0.1174 \text{ volt}}{0.1177 \text{ volt}} \times 100\% = 99,74\%$$

Nilai reduksi yang mempunyai eror kurang dari 5% antara hasil simulasi dan eksperimen, hal ini menunjukkan bahwa percepatan arah rotasi dinyatakan valid.

4.7. Validasi Uji T *Independent*

4.7.1. Validasi Uji T *Independent* Sistem Massa Utama tanpa CPVA

Proses validasi dilakukan dengan mengambil data RMS hasil simulasi dan eksperimen. Perhitungan dilakukan sesuai dengan teori statistik pengujian Uji T *independent* sebagai berikut:

Rumus *Independent sample t-test*

$$t_{hit} = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\frac{SS_1 + SS_2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

M_1 = rata-rata hasil simulasi 1

M_2 = rata-rata hasil eksperimen 2

SS_1 = *sum of square* simulasi 1

SS_2 = *sum of square* eksperimen 2

n_1 = jumlah pengambilan sample simulasi 1

n_2 = jumlah pengambilan sample eksperimen 2

Dimana:

$$M_1 = \frac{\sum x_1}{n_1} \quad SS_1 = \left(\frac{(\sum x_1^2)}{n_1} - \bar{x}_1^2 \right)^{0,5}$$

$$M_2 = \frac{\sum x_2}{n_2} \quad SS_2 = \left(\frac{(\sum x_2^2)}{n_2} - \bar{x}_2^2 \right)^{0,5}$$

Dari data RMS respon getaran arah translasi dan rotasi hasil simulasi dan eksperimen didapatkan hasil sbb:

Tabel 4.20 RMS respon getaran translasi dan rotasi pada simulasi dan eksperimen

N	Translasi Sim (m/s ²)	Translasi Ekp (m/s ²)	Rotasi Sim (rad/s ²)	Rotasi Eks (rad/s ²)
1	1,3602	1,2944	1,8215	1,7474
2	1,3602	1,294	1,8215	1,748
3	1,3602	1,2958	1,8215	1,7468
rata-rata (M)	1,3602	1,2947	1,8215	1,7474

Dari table 4.8 diatas diketahui

$$n_1 = 3$$

$$n_2 = 3$$

$$M_{11} \text{ translasi} = 1,3602 \text{ m/s}^2$$

$$M_{12} \text{ translasi} = 1,2947 \text{ m/s}^2$$

$$M_{21} \text{ rotasi} = 1,8215 \text{ rad/s}^2$$

$$M_{22} \text{ rotasi} = 1,7474 \text{ rad/s}^2$$

Dengan Hipotesa awal:

Ho : $\mu_1 = \mu_2$, diterima

Hi : $\mu_1 \neq \mu_2$, ditolak

Dengan $\alpha = 0,05$

- Gerak Translasi

$$SS_1 = \frac{(\sum x_1^2)}{n_1} - \bar{x}_1^2 = \left(\frac{(1,3602^2 + 1,3602^2 + 1,3602^2)}{3} - 1,3602^2 \right)^{0,5} = 0$$

$$SS_2 = \frac{(\sum x_2^2)}{n_2} - \bar{x}_2^2 = \left(\frac{(1,2944^2 + 1,294^2 + 1,2958^2)}{3} - 1,2947^2 \right)^{0,5} = 9,32 \times 10^{-3}$$

$$t_{hit} = \frac{M_{12} - M_{12}}{\sqrt{\frac{SS_1 + SS_2}{n_1 + n_2 - 2} * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

$$t_{hit} = \frac{1,3602 - 1,2947}{\sqrt{\frac{9,32 \times 10^{-3}}{6-2} * \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} \right)}}$$

$$= 1,908$$

Dari T tabel dengan $v = (n_1 + n_2) - 2 = (3 + 3) - 2 = 4$, dengan $\alpha = 0,05$ didapatkan nilai $t_{tabel} = 2,132$

- Gerak Rotasi

$$SS_1 = \frac{(\sum x_1^2)}{n_1} - \bar{x}_1^2 = \left(\frac{(1,8215^2 + 1,8215^2 + 1,8215^2)}{3} - 1,8215^2 \right)^{0,5} = 0$$

$$SS_2 = \frac{(\sum x_2^2)}{n_2} - \bar{x}_2^2 = \left(\frac{(1,7474^2 + 1,748^2 + 1,7468^2)}{3} - 1,747^2 \right)^{0,5} = 1,1428$$

$$t_{hit} = \frac{M_{21} - M_{22}}{\sqrt{\frac{SS_1 + SS_2}{n_1 + n_2 - 2} * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

$$t_{hit} = \frac{1,8125 - 1,7474}{\sqrt{\frac{2,4 \times 10^{-7}}{6-2} * \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} \right)}}$$

$$= 0,169$$

Dari T tabel dengan $v = (n_1 + n_2) - 2 = (3 + 3) - 2 = 4$, dengan $\alpha = 0,05$ didapatkan nilai $t_{tabel} = 2,132$

4.7.1.1. Pembahasan Uji T *Independent* Sistem Massa Utama tanpa CPVA

Perhitungan yang dilakukan pada subbab 4.7.1 diketahui bahwa hipotesa awal menunjukkan H_0 = diterima dan H_1 = ditolak ketika $t_{hit} < t_{tab}$. Dengan $\alpha = 0,05$, $v = (n_1 + n_2) - 2 = (3 + 3) - 2 = 4$. Didapatkan dari tabel distribusi T $t_{tab} = 2,132$.

Pengambilan data dilakukan untuk simulasi 3 kali dan eksperimen 3 kali, sebagai syarat bahwa untuk uji T *independent* data yang diambil kurang dari < 30 . Pada perhitungan gerak translasi didapatkan nilai $t_{hit} = 1,908$ dan untuk arah rotasi didapatkan nilai $t_{hit} = 0,169$. Dapat disimpulkan bahwa nilai $t_{hit} (1,908) < t_{tab} (2,132)$ untuk percepatan arah translasi dan nilai $t_{hit} (0,169) < t_{tab} (2,132)$ untuk percepatan arah rotasi maka pada hipotesa awal H_0 diterima. H_0 merupakan hipotesa awal yang menyimpulkan bahwa terdapat kesamaan data antara simulasi dan eksperimen dengan nilai eror dibawah 5% dan H_1 merupakan ketidaksetaraan data hasil simulasi dan eksperimen. Pada gerak translasi dan rotasi sistem massa utama tanpa CPVA dengan nilai $t_{hit \text{ rotasi}} (0,169)$; $t_{hit \text{ translasi}} (1,908) < t_{tab} (2,132)$ maka hasil dari eksperimen telah mempresentasikan hasil dari simulasi dan data yang didapatkan antara kedua hasil simulasi dan eksperimen valid. hal ini tentu saja dipengaruhi oleh diperbaikinya dari rangka alat simulator getaran dari bahan besi plat L ketebalan 1 mm dengan besi hollow dengan ketebalan 3 mm. dengan rangka yang lebih rigid getaran yang diserap pula akan semakin kecil.

4.7.2. Validasi Uji T *Independent* Pada Sistem Massa utama dengan CPVA

4.7.2.1. Validasi Reduksi Percepatan Translasi Menggunakan Metode Uji T *Independent*

Data yang diperoleh pada subbab 4.6.3 diujikan kembali dengan pengujian statistic menggunakan metode uji T *independent* untuk melihat respon percepatan arah translasi

mempunyai kesamaan data Antara simulasi dan eksperimen. Berikut validasi reduksi respon percepatan yang telah ditabelkan:

Tabel 4.21 Reduksi percepatan arah Translasi pada jarak 0 cm

N	Simulasi (%)	Eksperimen (%)
1	94,76	94,2
2	94,76	94,26
3	94,76	94,16
Rata-rata (M ₁)	94,76	94,23

Dari table 4.21 diatas diketahui

$$n_1 = 3$$

$$n_2 = 3$$

$$M_{11 \text{ sim}} = 94,76 \%$$

$$M_{12 \text{ exp}} = 94,23\%$$

Dengan Hipotesa awal:

Ho : $\mu_1 = \mu_2$, diterima

Hi : $\mu_1 \neq \mu_2$, ditolak

Dengan $\alpha = 0,05$

- Reduksi Percepatan Arah Translasi

$$SS_1 = \frac{(\sum x_1^2)}{n_1} - \bar{x}_1^2 = \left(\frac{94,76^2 + 94,76^2 + 94,76^2}{3} - 94,76^2 \right)^{0,5} = 0$$

$$SS_2 = \frac{(\sum x_2^2)}{n_2} - \bar{x}_2^2 = \left(\frac{94,2^2 + 94,26^2 + 94,16^2}{3} - 94,23^2 \right)^{0,5} = 0,794$$

$$t_{hit} = \frac{M_{11} - M_{12}}{\sqrt{\frac{SS_1 + SS_2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

$$t_{hit} = \frac{1.3602 - 1.2947}{\sqrt{\frac{9,32 \times 10^{-3}}{6-2} * \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3}\right)}}$$

$$= 1,456$$

Dari T tabel dengan $v = (n_1 + n_2) - 2 = (3 + 3) - 2 = 4$, dengan $\alpha = 0,05$ didapatkan nilai $t_{tabel} = 2,132$

Seperti pada perhitungan diatas didapatkan untuk jarak penempatan CPVA 10 cm dan 20 cm ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 4.22 reduksi Percepatan arah translasi terhadap peletakan CPVA

Jarak k (cm)	M ₁₁ (%)	M ₁₂ (%)	Ss 1	Ss2	T _{hit}	a	v	T _{tab}
0	94,7 6	94,2 3	0	0,79 4	1,45 6	0,0 5	4	2,13 2
10	94,5	94,3	0	0,08 2	1,71	0,0 5	4	2,13 2
20	95,2 8	94,9 9	0	0,16 4	1,75 4	0,0 5	4	2,13 2

4.7.2.2. Pembahasan Uji T independent Respon Percepatan Translasi

Perhitungan yang dilakukan pada subbab 4.7.2.1 diketahui bahwa hipotesa awal menunjukkan $H_0 =$ diterima dan $H_1 =$ ditolak ketika $t_{hit} < t_{tab}$. Dengan $\alpha = 0,05$, $v = (n_1 + n_2) - 2 = (3 + 3) - 2 = 4$. Didapatkan dari tabel distribusi T $t_{tab} = 2,132$.

Pengambilan data dilakukan untuk simulasi 3 kali dan eksperimen 3 kali, sebagai syarat bahwa untuk uji T *independent* data yang diambil kurang dari < 30 . Terlihat pada tabel 4.22 bahwa variasi jarak peletakan CPVA terhadap reduksi untuk

respon percepatan arah translasi $t_{hit} < t_{tab}$. Dari perhitungan yang didapatkan $t_{hit} < t_{tab}$ pada semua variasi jarak peletakan CPVA terhadap reduksi getaran respon percepatan arah translasi pada jarak 0 cm $t_{hit} (1,456) < t_{tab} (2,132)$, pada jarak peletakan CPVA 10 cm $t_{hit} (1,71) < t_{tab} (2,132)$, dan pada jarak peletakan CPVA 20 cm $t_{hit} (1,754) < t_{tab} (2,132)$ menunjukkan bahwa H_0 diterima. Hal ini menyimpulkan bahwa reduksi percepatan arah translasi yang terjadi pada setiap variasi jarak peletakan CPVA mempunyai kesamaan data antara hasil simulasi dan eksperimen. Dari data yang didapatkan antara hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa data valid.

4.7.2.3. Validasi Reduksi Percepatan Rotasi Menggunakan Metode Uji T Independent

Data yang diperoleh pada subbab 4.6.3 diujikan kembali dengan pengujian statistic menggunakan metode uji T independent untuk melihat respon percepatan rotasi mempunyai kesamaan data Antara simulasi dan eksperimen. Berikut validasi reduksi respon percepatan yang telah ditabelkan:

Tabel 4.23 Reduksi percepatan arah Rotasi pada jarak 0 cm

N	Simulasi (%)	Eksperimen (%)
1	97,546	97,354
2	97,546	97,292
3	97,546	97,2
Rata-rata (M)	97,546	97,283

Dari table 4.23 diatas diketahui:

$$n_1 = 3$$

$$n_2 = 3$$

$$M_{21 \text{ sim}} = 97,546 \%$$

$$M_{22 \text{ eksp}} = 97,354\%$$

Dengan Hipotesa awal:

Ho : $\mu_1 = \mu_2$, diterima

Hi : $\mu_1 \neq \mu_2$, ditolak

Dengan $\alpha = 0,05$

- Reduksi Percepatan Arah Rotasi

$$SS_1 = \frac{(\sum x_1^2)}{n_1} - \bar{x}_1^2 = \left(\frac{97,546^2 + 97,546^2 + 97,546^2}{3} - 97,546^2 \right)^{0,5} = 0$$

$$SS_2 = \frac{(\sum x_2^2)}{n_2} - \bar{x}_2^2 = \left(\frac{(97,354^2 + 97,292^2 + 97,2^2)}{3} - 97,283^2 \right)^{0,5} = 0,807$$

$$t_{hit} = \frac{M_{21} - M_{22}}{\sqrt{\frac{SS_1 + SS_2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

$$t_{hit} = \frac{1.3602 - 1.2947}{\sqrt{\frac{0,807}{6-2} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} \right)}}$$

$$= 0,717$$

Dari T tabel dengan $v = (n_1 + n_2) - 2 = (3 + 3) - 2 = 4$, dengan $\alpha = 0,05$ didapatkan nilai $t_{tabel} = 2,132$

Seperti pada perhitungan diatas didapatkan untuk jarak penempatan CPVA 10 cm dan 20 cm ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 4.24 reduksi Percepatan arah rotasi terhadap peletakan CPVA

Jarak (cm)	M ₂₁ (%)	M ₂₂ (%)	SS ₂₁	SS ₂₂	T _{hit}	a	v	T _{tab}
0	97,546	97,283	0	0,807	0,717	0,05	4	2,132
10	97,77	97,61	0	1,275	0,347	0,05	4	2,132
20	97,376	97,61	0	0,806	0,398	0,05	4	2,132

4.7.2.4. Pembahasan Uji T independent Respon Percepatan Rotasi

Perhitungan yang dilakukan pada subbab 4.7.2.3 diketahui bahwa hipotesa awal menunjukkan H_0 = diterima dan H_1 = ditolak ketika $t_{hit} < t_{tab}$. Dengan $\alpha = 0,05$, $v = (n_1 + n_2) - 2 = (3 + 3) - 2 = 4$. Didapatkan dari tabel distribusi T $t_{tab} = 2,132$.

Pengambilan data dilakukan untuk simulasi 3 kali dan eksperimen 3 kali, sebagai syarat bahwa untuk uji T *independent* data yang diambil kurang dari < 30 . Terlihat pada tabel 4.24 bahwa variasi jarak peletakan CPVA terhadap reduksi untuk respon percepatan arah Rotasi $t_{hit} < t_{tab}$. Dari perhitungan yang didapatkan $t_{hit} < t_{tab}$ pada semua variasi jarak peletakan CPVA terhadap reduksi getaran respon percepatan arah rotasi pada jarak 0 cm $t_{hit} (0,717) < t_{tab} (2,132)$, pada jarak peletakan CPVA 10 cm $t_{hit} (0,347) < t_{tab} (2,132)$, dan pada jarak peletakan CPVA 20 cm $t_{hit} (0,398) < t_{tab} (2,132)$ menunjukkan bahwa H_0 diterima. Hal ini menyimpulkan bahwa reduksi respon percepatan arah rotasi yang terjadi pada setiap variasi jarak peletakan CPVA mempunyai kesamaan data antara hasil simulasi dan eksperimen. Dari data yang didapatkan antara hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa data valid.

4.7.2.5. Validasi Energi listrik Bangkitan Menggunakan Metode Uji T *independent*

Data yang diperoleh pada subbab 4.6.3 diujikan kembali dengan pengujian statistic menggunakan metode uji T *independent* untuk melihat data energi listrik apakah bangkitan mempunyai kesamaan data Antara simulasi dan eksperimen. Berikut validasi energi listrik bangkitan yang telah ditabelkan:

Tabel 4.25 Energi listrik bangkitan (volt) hasil simulasi dan eksperimen

N	Simulasi (volt)	Eksperimen (volt)
1	0,1151	0,1148
2	0,1151	0,1132
3	0,1151	0,1142
Rata-rata (M)	0,1151	0,114

Dari table 4.25 diatas diketahui

$$n_1 = 3$$

$$n_2 = 3$$

$$M_{31 \text{ sim}} = 0,1151 \text{ volt}$$

$$M_{32 \text{ exp}} = 0,114 \text{ volt}$$

Dengan Hipotesa awal:

Ho : $\mu_1 = \mu_2$, diterima

Hi : $\mu_1 \neq \mu_2$, ditolak

Dengan $\alpha = 0,05$

• Energi Listrik Bangkitan

$$SS_1 = \frac{(\sum x_1^2)}{n_1} - \bar{x}_1^2 = \left(\frac{0,1151^2 + 0,1151^2 + 0,1151^2}{3} - 0,1151^2 \right)^{0,5} = 0$$

$$SS_2 = \frac{(\sum x_2^2)}{n_2} - \bar{x}_2^2 = \left(\frac{(0,1148^2 + 0,1132^2 + 0,1142^2)}{3} - 0,114^2 \right)^{0,5} = 3,95 \times 10^{-3}$$

$$t_{hit} = \frac{M_{31} - M_{32}}{\sqrt{\frac{SS_1 + SS_2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

$$t_{hit} = \frac{1.3602 - 1.2947}{\sqrt{\frac{3,95 \times 10^{-3}}{6-2} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} \right)}}$$

$$= 0,042$$

Dari T tabel dengan $v = (n_1 + n_2) - 2 = (3 + 3) - 2 = 4$, dengan $\alpha = 0,05$ didapatkan nilai $t_{\text{tabel}} = 2,132$

Seperti pada perhitungan diatas didapatkan untuk jarak penempatan CPVA 10 cm dan 20 cm ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 4.26 Validasi Energi listrik Bangkitan (volt) terhadap peletakan CPVA

Jarak (cm)	M ₃₁ (volt)	M ₃₂ (volt)	SS ₁	SS ₂	Thit	a	v	Ttab
0	0,1151	0,114	0	$3,95 \times 10^{-3}$	0,042	0,05	4	2,132
10	0,1177	0,1162	0	$9,09 \times 10^{-4}$	0,122	0,05	4	2,132
20	0,1174	0,1156	0	$2,89 \times 10^{-3}$	0,082	0,05	4	2,132

4.7.2.6. Pembahasan Uji T *independent* terhadap Energi Listrik Bangkitan

Perhitungan yang dilakukan pada subbab 4.7.2.5 diketahui bahwa hipotesa awal menunjukkan H_0 = diterima dan H_1 = ditolak ketika $t_{\text{hit}} < t_{\text{tab}}$. Dengan $\alpha = 0,05$, $v = (n_1 + n_2) - 2 = (3 + 3) - 2 = 4$. Didapatkan dari tabel distribusi T $t_{\text{tab}} = 2,132$.

Pengambilan data dilakukan untuk simulasi 3 kali dan eksperimen 3 kali, sebagai syarat bahwa untuk uji T *independent* data yang diambil kurang dari < 30 . Terlihat pada tabel 4.26 bahwa variasi jarak peletakan CPVA terhadap energi listrik bangkitan $t_{\text{hit}} < t_{\text{tab}}$. Dari perhitungan yang didapatkan $t_{\text{hit}} < t_{\text{tab}}$ pada semua variasi jarak peletakan CPVA terhadap energi listrik bangkitan (volt) pada jarak 0 cm $t_{\text{hit}} (0,042) < t_{\text{tab}} (2,132)$, pada jarak peletakan CPVA 10 cm $t_{\text{hit}} (0,122) < t_{\text{tab}} (2,132)$, dan pada jarak peletakan CPVA 20 cm $t_{\text{hit}} (0,082) < t_{\text{tab}} (2,132)$ menunjukkan bahwa H_0 diterima. Hal ini menyimpulkan bahwa energi listrik bangkitan (volt) yang terjadi pada setiap variasi jarak peletakan CPVA mempunyai kesamaan data antara hasil simulasi dan

eksperimen. Dari data yang didapatkan antara hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa data valid.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN & SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbaikan rangka pada alat simulator getaran dari bahan pada penelitian sebelumnya^[1] berbahan besi profil L dengan ketebalan 1 mm diperbaiki dengan bahan besi hollow dengan ketebalan 3 mm telah berhasil menahan energi getaran dari gaya eksitasi motor agar tidak terserap oleh rangka, serta menghasikan eror pada respon percepatan arah translasi dan rotasi pada sistem massa utama di bawah 5% .
2. Frekuensi kerja yang semakin mendekati atau berada pada frekuensi natural sistem mengakibatkan getaran yang terjadi pada sistem utama, massa absorber, dan *piezoelektrik* bertambah besar. Hal ini menyebabkan voltase listrik yang dihasilkan dari CPVA semakin besar. Namun untuk reduksi getaran yang dihasilkan CPVA semakin menurun, dan sebaliknya
3. Pada peletakan CPVA 10 cm dari titik tengah massa utama, menghasilkan reduksi getaran respon percepatan arah translasi yang terbesar untuk hasil simulasi sebesar 94,95% dan 94,19% hasil eksperimen, dengan nilai validasi antara hasil simulasi dan eksperimen sebesar 99,47%. Untuk reduksi getaran respon percepatan arah rotasi hasil simulasi didapatkan 97,77% dan 97,625% hasil eksperimen, dengan nilai validasi respon percepatan arah rotasi sebesar 99,74% antara hasil simulasi dan eksperimen.
4. Pada peletakan CPVA 10 cm dari titik tengah massa utama, energi listrik bangkitan yang dapat dihasilkan sebesar 0,1177 volt untuk hasil simulasi dan 0,1174 volt untuk

ekperimen, dengan nilai validasi sebesar 99,74% antara hasil simulasi dan eksperimen.

5. Dengan variasi jumlah *piezoelectric* yang semakin sedikit mengakibatkan energi listrik bangkitan juga semakin besar. Pada jarak peletakan CPVA 10 cm didapatkan nilai $n_1 = 0,1174$ volt, $n_2 = 0,1128$ volt, dan $n_3 = 0,1097$ volt, hal ini diakibatkan oleh reduksi terbesar di jarak peletakan CPVA 10 cm dari titik pusat massa utama yang membuat defleksi dari *piezoelectric* semakin besar.
6. Validasi statistic pada sistem massa utama didapatkan nilai t_{tabel} 2,132 dan nilai t_{hit} untuk respon percepatan arah translasi 1,908 dan 0,169 untuk hasil t_{hit} respon percepatan arah rotasi. dari ke-2 tersebut bahwa $t_{hit} < t_{tabel}$ maka dapat disimpulkan bahwa hipotesa H_0 diterima dan disimpulkan bahwa sistem massa utama pada percepatan translasi dan rotasi dinyatakan valid
7. Validasi statistic pada sistem massa utama dengan penambahan CPVA dengan variasi jarak peletakan CPVA 0 cm, 10 cm, dan 20 cm terhadap respon percepatan translasi dan rotasi serta energi listrik bangkitan (volt) didapatkan nilai $t_{hit} < t_{tabel}$, maka disimpulkan bahwa validasi sistem massa utama dengan penambahan CPVA untuk hipotesa H_0 diterima dan dinyatakan bahwa data antara hasil simulasi dan eksperimen valid.

5.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan diperoleh saran sebagai berikut:

1. Sebelum melakukan pengambilan data ekperimen pastikan pegas yang dipakai sesuai dengan kebutuhan, pastikan dahulu baut-baut pada alat uji terpasang dengan baik atau tidak ada yang longgar.

2. Uji kalibrasi terlebih dahulu untuk probe accelerometer karena data yang diambil dengan kondisi probe accelerometer tidak terkalibrasi dapat menghasilkan data yang tidak valid.
3. Pastikan kondisi listrik saat pengambilan data normal, tidak naik turun, karena hal ini dapat mempengaruhi data yang diambil menjadi tidak valid.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Safei, I., 2017. **Rancang Bangun dan Analisis Mekanisme Cantilever *Piezoelectric* Vibration Absorber (CPVA) sebagai Peredam dan Pembangkit Listrik.** Jurnal Teknik. Vol 4, 1:2337-3539
- [2] Danawan, F. I., 2017. **Pemodelan dan Analisi Reduksi Respon Getaran Translasi dan Rotasi pada Sistem Utama dan Energi Listrik yang Dibangkitkan Oleh Mekanisme Cantilever *Piezoelectric* Vibration Absorber (CPVA).** Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institute Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- [3] Kundu, Sushanta, Mei 2016. "Modelling and Simulation of a *Piezoelectric* Vibration Energi Harvester". **Procedia Engineering** vol 144:568-575
- [4] Chen, W.M and Liu, T.S. October 2013. **Modeling and Experimental Validation Of Two Degree-Of-Freedom *Piezoelectric* Actuators.** Elsevier 23:1163-1170
- [5] Kuang, Y. and Zhu, M. July 2017. **Design study of a Mechanically *Piezoelectric* Energi Harvester Using Validated Finite Element Modelling.** Elsevier Vol 263:510-520
- [6] Rao, Singiresu S. 2011. **Mechanical Vibrations, Fifth Edition.** Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.
- [7] Blank, L. 1982. **Statistical Procedures For Engineering, Management, And Science.** McGraw-Hill, Inc.
- [8] Chapra, Steven C. 2010. **Numerical Methods for Engineers, Sixth Edition.** McGraw-Hill, Inc.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

Percepatan Arah Translasi Pada Peletakan CPVA 0 cm												
Freq (Hz)	8 pzt		10 pzt		12 pzt		Akurasi (%)			Error (%)		
	Sim (m/s ²)	Eks (m/s ²)	Sim (m/s ²)	Eks (m/s ²)	Sim (m/s ²)	Eks (m/s ²)	8pzt	10pzt	12 pzt	8pzt	10pzt	12pzt
5.1	0.222	0.111	0.228	0.1195	0.228	0.1167	50.014	52.206	51.086	49.985	47.793	48.913
5.7	0.071	0.074	0.073	0.0772	0.075	0.0780	95.962	95.174	96.968	4.0376	4.8256	3.0316
6.1	0.156	0.087	0.154	0.0783	0.153	0.0807	55.947	50.570	52.526	44.052	49.429	47.473

Validasi Percepatan dan Energi Listrik Dengan CPVA

A. Peletakan CPVA 0 cm dari titik pusat massa utama

Percepatan Arah Rotasi Pada Peletakan CPVA 0 cm												
Freq (Hz)	8 pzt		10 pzt		12 pzt		Akurasi (%)			Error (%)		
	Sim (rad/s ²)	Eks (rad/s ²)	Sim (rad/s ²)	Eks (rad/s ²)	Sim (rad/s ²)	Eks (rad/s ²)	8pzt	10pzt	12pzt	8pzt	10pzt	12pzt
5.1	0.179	0.1080	0.184	0.1153	0.188	0.1208	60.051	62.409	64.127	39.948	37.590	35.872
5.7	0.044	0.0462	0.046	0.0477	0.047	0.0488	96.683	96.787	97.790	3.3164	3.2122	2.2094
6.1	0.071	0.0419	0.071	0.0336	0.070	0.0364	58.612	47.417	51.704	41.387	52.582	48.295

Energi Listrik Bangkitan Pada Peletakan CPVA 0 cm												
Frekuensi (Hz)	8 pzt		10 pzt		12 pzt		Akurasi (%)			Error (%)		
	Sim (volt)	Eks (volt)	Sim (volt)	Eks (volt)	Sim (volt)	Eks (volt)	8pzt	10pzt	12pzt	8pzt	10pzt	12pzt
5.1	1.195	0.0899	1.152	0.0813	0.976	0.0766	7.5233	7.0558	7.8487	92.476	92.944	92.151
5.7	0.125	0.119	0.120	0.1143	0.117	0.1124	95.123	94.803	95.371	4.8763	5.1962	4.6282
6.1	0.054	0.1082	0.052	0.0917	0.050	0.0800	50.515	56.990	63.322	49.484	43.009	36.677

B. Peletakan CPVA 0 cm dari titik pusat massa utama

Percepatan Arah Translasi Pada Peletakan CPVA 10 cm												
Freq (Hz)	8 pzt (m/s ²)		10 pzt (m/s ²)		12 pzt (m/s ²)		Akurasi (%)			Error (%)		
	sim	eks	sim	eks	sim	eks	8pzt	10pzt	12pzt	8pzt	10pzt	12pzt
5.1	0.31	0.1186	0.32	0.1119	0.33	0.1198	37.939	34.053	36.280	62.060	65.946	63.719
5.7	0.07	0.0752	0.07	0.0713	0.06	0.0706	97.872	98.130	96.226	2.1276	1.8691	3.7735
6.1	0.07	0.0761	0.07	0.0766	0.07	0.0776	97.606	99.826	99.355	2.3931	0.1739	0.6443

Percepatan Arah Rotasi Pada Peletakan CPVA 10 cm												
Freq (Hz)	8 pzt		10 pzt		12 pzt		Akurasi (%)			Error (%)		
	Sim (rad/s)	Eks (rad/s)	Sim (rad/s)	Eks (rad/s)	Sim (rad/s)	Eks (rad/s)	8pzt	10pzt	12pzt	8pzt	10pzt	12pzt
5.1	0.190	0.128	0.2	0.1214	0.202	0.1239	67.226	60.7	61.336	32.773	39.3	38.663
5.7	0.040	0.041	0.041	0.0414	0.039	0.0412	97.590	98.954	96.601	2.4096	1.0458	3.3980
6.1	0.067	0.042	0.065	0.0487	0.063	0.0414	63.224	74.744	65.044	36.775	25.255	34.955

Energi Listrik Bangkitan Pada Peletakan CPVA 10 cm												
Freq (Hz)	8 pzt		10 pzt		12 pzt		Akurasi (%)			Error (%)		
	Sim (volt)	Eks (volt)	Sim (volt)	Eks (volt)	Sim (volt)	Eks (volt)	8pzt	10pzt	12pzt	8pzt	10pzt	12pzt
5.1	1.732	0.0953	1.442	0.1091	1.23	0.0903	5.5032	7.5695	7.3080	94.496	92.430	92.691
5.7	0.117	0.1174	0.113	0.1117	0.11	0.1097	99.744	98.747	99.741	0.2550	1.2522	0.2589
6.1	0.101	0.1022	0.094	0.1205	0.04	0.0922	98.769	78.611	49.535	1.2306	21.388	50.464

C. Peletakan CPVA 0 cm dari titik pusat massa utama

Percepatan Arah Translasi Pada Peletakan CPVA 20 cm												
Freq (Hz)	8 pzt		10 pzt		12 pzt		Akurasi (%)			Error (%)		
	Sim (m/s ²)	Eks (m/s ²)	Sim (m/s ²)	Eks (m/s ²)	Sim (m/s ²)	Eks (m/s ²)	8pzt	10pzt	12pzt	8pzt	10pzt	12pzt
5.1	0.37	0.0967	0.40	0.0947	0.422	0.0697	25.933	23.230	16.489	74.066	76.769	83.510
5.7	0.06	0.0651	0.06	0.0635	0.063	0.0648	98.617	95.225	97.742	1.3824	4.7743	2.2570
6.1	0.13	0.0879	0.13	0.0905	0.137	0.0907	64.679	67.739	65.867	35.320	32.260	34.132

Percepatan Arah Rotasi Pada Peletakan CPVA 20 cm												
Frekuensi (Hz)	8 pzt		10 pzt		12 pzt		Akurasi (%)			Error (%)		
	Sim (rad/s ²)	Eks (rad/s ²)	sim (rad/s ²)	Eks (rad/s ²)	Sim (rad/s ²)	Eks (rad/s ²)	8pzt	10pzt	12pzt	8pzt	10pzt	12pzt
5.1	0.17	0.1193	0.18	0.1152	0.19	0.0902	69.642	61.971	46.440	30.357	38.028	53.559
5.7	0.04	0.0487	0.04	0.0480	0.04	0.0412	98.017	95.142	97.899	1.9822	4.8577	2.1001
6.1	0.07	0.0418	0.07	0.0492	0.07	0.0447	53.813	63.565	57.976	46.186	36.434	42.023

Energi Listrik Bangkitan Pada Peletakan CPVA 20 cm												
Freq (Hz)	8 pzt		10 pzt		12 pzt		Akurasi (%)			Error (%)		
	Sim (volt)	Eks (volt)	Sim (volt)	Eks (volt)	Sim (volt)	Eks (volt)	8pzt	10pzt	12pzt	8pzt	10pzt	12pzt
5.1	1.934	0.1093	1.671	0.1174	1.476	0.0969	5.6544	7.0241	6.5642	94.345	92.975	93.435
5.7	0.119	0.1167	0.117	0.1168	0.125	0.1237	97.799	99.068	98.724	2.2006	0.9315	1.2753
6.1	0.085	0.1141	0.082	0.1163	0.081	0.1227	74.803	71.278	66.074	25.196	28.721	33.925

Tabel Distribusi T Statistik

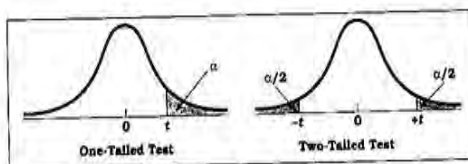


Table D.6 Percentage Points of the *t* Distribution (Source: The entries in this table were computed by the author.)

<i>df</i>	Level of Significance for One-Tailed Test								
	.25	.20	.15	.10	.05	.025	.01	.005	.0005
	Level of Significance for Two-Tailed Test								
	.50	.40	.30	.20	.10	.05	.02	.01	.001
1	1.000	1.376	1.863	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	63.662
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.599
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.768
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.496
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.390
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

BIODATA PENULIS



Hilman Syahir dilahirkan di Kuningan, 24 Juni 1992 anak yang terlahir dari orangtua terbaik bernama Arisman dan Titin Tini Agustini. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN Winduhaji I, Kel. Winduhaji, Kab. Kuningan pada tahun 1998-2004. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN I Kuningan, Kab. Kuningan pada tahun 2004-2007, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 1 Kuningan pada tahun 2007-2010.

Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang D3 di Universitas Pendidikan Indonesia pada tahun 2010-2013. Setelah Lulus penulis sempat bekerja diperusahaan part otomotif selama 1 tahun. Pada tahun 2015 penulis melanjutkan studi S1 program Lintas Jalur (LJ) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Motto hidup penulis adalah *“Man Jadda Wajada”* menjadikan penulis lebih bersemangat dan berusaha keras untuk mencapai sesuatu yang diinginkannya. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email hilmansyahir2@gmail.com.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”